

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroniky

Mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač
Microprocesor Control Puls Rectifier

2012

Miroslav Zeman

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Miroslav Zeman

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

2612T015 Elektronika

Téma:

Mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač
Microprocesor Control Pulse Rectifier

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte teoretický popis výkonového měniče a simulací tyto předpoklady ověřte.
2. Dimenzujte komponenty výkonového měniče.
3. Vytvořte 3D CAD modelovou sestavu pulsního usměrňovače.
4. Navržené řešení realizujte.
5. Proveďte seznámení se s řídicími obvody měniče.
6. Proveďte ověření funkčnosti spolupráce výkonové části s řídicími obvody v rozsahu stanoveném vedoucím diplomové práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

- Vondrášek, F.: Výkonová elektronika III - Měniče s vlastní komutací a bez komutace, Plzeň 2009.
- Slavík, I., Konštrukcia výkonových polovodičových meničov, 1. vydání, ALFA, Bratislava 1985.
- Aksentov, A. I., Glušková, D.N., Ivanov, V.I.: Chlazení polovodičových součástek, 1. vydání, SNTL, Praha 1975.
- Patočka, M.: Matematická analýza signálů sinusové PWM, Plzeň 1995, str. 233-238 .
- Patočka, M.: Výkonové poměry v soustavě trojfázový střídač – asynchronní motor, Plzeň 1997, str. 117-122.
- Tremblay, T.: Autodesk Inventor 2010: No Experience Required, Indianapolis 2009.
- Bose, B.: Modern Power Electronics and AC drives, The University of Tennessee 2001.
- William, M.: Introduction to Solid State Power Electronics, POWEREX Semiconductor Division Youngwood, Pennsylvania 1977.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Vaculík**

Datum zadání: 18.11.2011

Datum odevzdání: 04.05.2012

doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 4.5.2012



.....

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Petru Vaculíkovi, Ph.D. za odborné vedení během mé práce, Ing. Davidu Slivkovi za pomoc při realizaci řídicí části a doktorandům Katedry elektroniky.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem a konstrukčním řešením mikroprocesorově řízeného pulzního měniče určeného především pro laboratorní účely na Katedře elektroniky. V první části práce je uveden rozbor vlastností a rozdělení měničů a bezpotenciálových modulů IGBT. Druhá část se zabývá mikroprocesorovým řídicím systémem a způsoby řízení. Třetí část práce je zaměřena na volbu kondenzátorové baterie a výpočty ztrát měniče, které jsou potřebné pro určení vhodného chlazení. Předposlední čtvrtá část se zabývá virtuálním návrhem a samotným konstrukčním řešením mikroprocesorově řízeného pulsního usměrňovače. Závěrečná část shrnuje poznatky z měření na měniči.

Klíčová slova:

Měnič; pulsní usměrňovač; mikroprocesorově řízený; bezpotenciálové moduly; budiče IGBT; IGBT; napěťové čidla; proudová čidla; ztrátový výkon

Abstract

This master thesis describes the design and construction solutions of microprocessor-controlled pulse converter intended primarily for laboratory use in the electronics department. The first part contains an analysis of the properties and sorting of converter and IGBT insulated modules. The second part deals with the microprocessor control system and management methods. The third part is focused on the choice of capacitor battery and inverter loss calculations that are needed for choose a suitable cooling. The penultimate fourth part deals with the virtual design and construction design of microprocessor controlled pulse rectifier. The final section summarizes the findings from the measurements on converter.

Key words:

Converter; Pulse Rectifier; Microprocessor Control; Isolated Modules; IGBT Driver; IGBT; Voltage Sensor; Current Sensor; Power Dissipation

Seznam použitých symbolů a zkratek

f_{REF}	Hz	referenční frekvence
f_s	Hz	spínací frekvence měniče
$I_{(av)}$	A	střední hodnota proudu
$I_{(av)T}$	A	střední hodnota proudu tranzistorem
$I_{(av)D}$	A	střední hodnota proudu antiparalelní diody
I_n	A	jmenovitý vstupní proud
$I_{n(m)}$	A	jmenovitý proud modulem
I_{rms}	A	efektivní hodnota proudu
n_p	-	modulační frekvenční poměr
P_{TOT}	W	celkový ztrátový výkon měniče
R_{vsr}	k Ω	balanční odpor
r_f	Ω	diferenciální propustný odpor
R_{Gon}	Ω	odpor na gate tranzistoru v sepnutém stavu
$R_{th(j-c)D}$	K/W	tepelný odpor, PN přechod – pouzdro diody
$R_{th(j-c)T}$	K/W	tepelný odpor, PN přechod – pouzdro tranzistoru
$R_{th(c-h)TP}$	K/W	tepelný odpor teplovodivé pasty, pouzdro – chladič
T_a	°C	teplota okolí
T_h	°C	teplota povrchu chladiče
T_{h-a}	°C	tepelná ztráta mezi chladičem a okolím
T_j	°C	teplota PN přechodu
T_{j-h}	°C	tepelná ztráta mezi PN přechodem a chladičem
t_r	s	čas nárůstu proudu tranzistorem
t_f	s	čas poklesu proudu tranzistorem
U_{CE}	V	prahové napětí tranzistoru
U_{CEref}	V	referenční prahové napětí tranzistoru
U_d	V	napětí v meziobvodu
U_n	V	jmenovité vstupní napětí
U_{F0}	V	hradlové napětí naprázdno
U_{REF}	V	referenční napětí
W_{on}	mJ	ztrátová energie vzniklá sepnutím tranzistoru
W_{off}	mJ	ztrátová energie vzniklá rozepnutím tranzistoru
z_u	-	poměr spínání tranzistoru k periodě

ADC	analogově digitální převodník
COP	časovač watchdogu (Computer Operating Properly)
DAC	digitálně analogový převodník
DPS	deska plošných spojů
DSC	digitální signálový kontrolér (Digital Signal Controller)
DSP	digitální signálový procesor (Digital Signal Processor)
FET	elektromagnetickým polem řízený tranzistor (Field-Effect Transistor)
GTO	hradlem vypínatelný tyristor (Gate Turn off Thyristor)
I ² C	sběrnice pro připojení integrovaných zařízení
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IGCT	tyristor komutovaný řídicí elektrodou (Integrated Gate-commutated Thyristor)
JTAG	programovací rozhraní (Joint Test Action Group Port)
MCU	mikrokontrolér (Microcontroller Unit)
MIPS	jednotka výkonu mikroprocesoru – počet miliónů instrukcí za sekundu
MOSFET	polem řízený tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
MSPS	jednotka vzorkování A/D převodníku – počet miliónu vzorků za sekundu
PIT	programovatelný časovač intervalů
PWM	pulsně šířková modulace
SCI	sériové komunikační rozhraní
SPI	rozhraní pro sériovou komunikaci s periferními obvody
USB	univerzální sériové rozhraní (Universal Serial Bus)

Úvod	8
1 Mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač	9
1.1 Základní rozdělení měničů	10
1.2 Pulsní usměrňovač	11
1.2.1 Proudový pulsní usměrňovač	12
1.2.2 Napěťový pulsní usměrňovač	13
1.3 IGBT	16
2 Řídicí a měřicí část pulsního usměrňovače	19
2.1 Řídicí jednotka Freescale	19
2.1.1 Principy řízení pulsního usměrňovače	23
2.1.1.1 Řízení s konstantním kmitočtem spínání	23
2.1.1.2 Řízení s konstantní dobou sepnutí	23
2.1.1.3 Řízení dvouhodnotové	23
2.1.2 Pulsně – šířková modulace	24
2.1.2.1 Vektorová pulsně - šířková modulace	24
2.1.2.2 Komparační pulsně – šířková modulace	25
2.2 Budiče IGBT	26
2.3 Čidla	28
3 Dimenzování komponent	30
3.1 Chlazení	30
3.1.1 Určení ztrát pulsního usměrňovače	31
3.1.2 Výpočet chladiče	33
3.2 Kondenzátorová baterie	35
3.3 Jištění	38
4 Konstrukce měniče	39
4.1 3D CAD model	39
4.2 Kondenzátorová baterie	41
4.3 Měřicí desky	42
4.3.1 Deska pro měření proudu	42
4.3.2 Deska pro měření napětí	43
4.3.3 Deska budičů	44
4.4 Řídicí deska Freescale	46
4.5 Napájení řídicích a měřicích obvodů	47
5 Měření	48
5.1 Neřízený usměrňovač	48
5.2 Identifikace veličin potřebných pro realizaci struktury vektorového řízení pulsního měniče	49
Závěr	52
Literatura	53
Seznam příloh	55

Úvod

Zařízení zajišťující přeměnu elektrické energie jsou nedílnou součástí veškerých elektronických a elektrotechnických zařízení. Již v druhé polovině dvacátého století byly konstruovány diodové usměrňovače, které jsou stále využívány s drobnou obměnou v podobě nových výrobních technologií zajišťující nové možnosti. Dalším velkým krokem pro polovodičové měniče byl tyristor, díky němuž bylo možné usměrňovače a střídače řídit což dioda neumožňuje. Pokrok se nezastavil a vývoj jde nezadržitelně kupředu a tak elektrotechnický průmysl přišel s dalšími polovodičovými součástkami, které lze řídit dle potřeby a vlastnostmi uspokojující většinu potřeb kladených na nová zařízení.

Řízené polovodičové usměrňovače lze využít pro mnohá zařízení a velmi často se uplatňují v pohonech především pro stejnosměrné motory, při spojení se střídačem lze rozšířit použitelnost například na řízení asynchronních motorů a mnohá další zařízení.

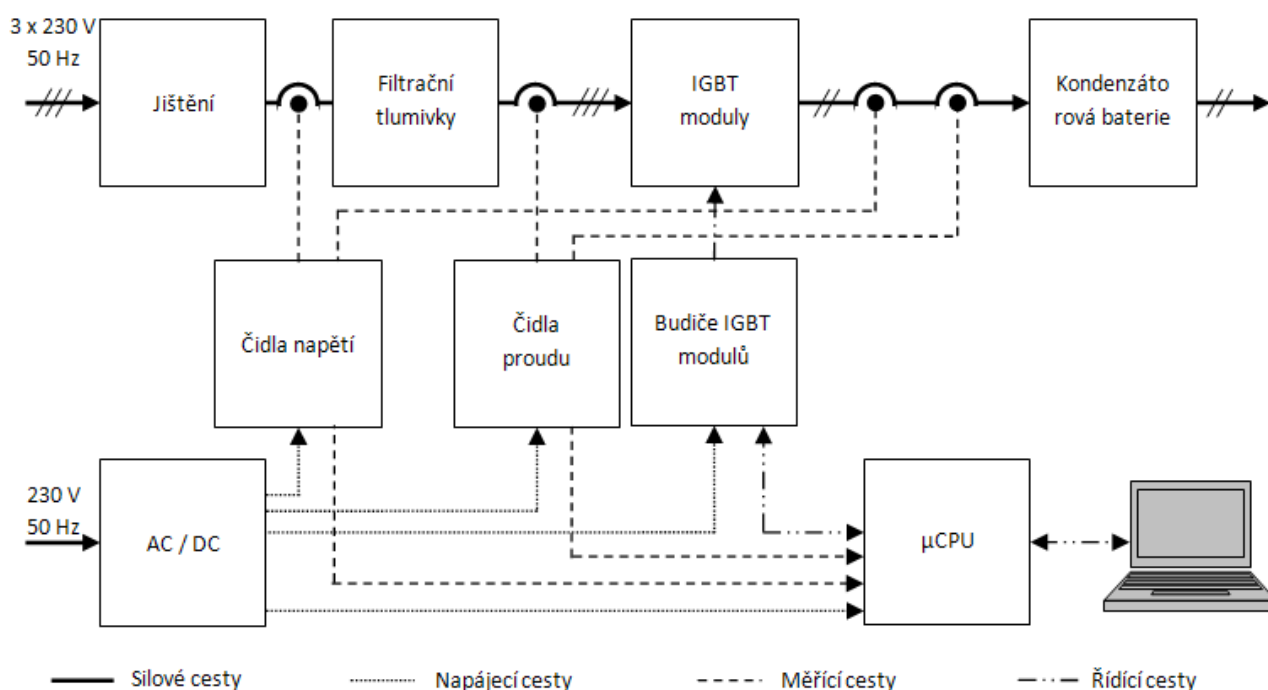
S rostoucími požadavky kladenými na polovodičové měniče a na metody jejich řízení došlo k propojení těchto měničů s mikroprocesorovými řídicími systémy, které zajišťují maximální efektivnost řízení a společně s moderními polovodičovými součástkami a filtračními obvody snižují zpětné dopady na napájecí síť.

Tato diplomová práce je zaměřena na analýzu a konstrukci mikroprocesorově řízeného pulsního usměrňovače využívajícího IGBT bezpotenciálové moduly.

1 Mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač

Mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač je elektrické zařízení spojující polovodičový měnič s moderními výpočetními prvky. V tomto případě se jedná o IGBT moduly a signálový procesor zajišťující řízení a ovládání měniče v reálném čase prostřednictvím periférií.

Celý mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač je blokově vyobrazen na obrázku 1, ovládání a měření je prováděno prostřednictvím počítače připojeného prostřednictvím USB kabelu k desce mikroprocesoru.



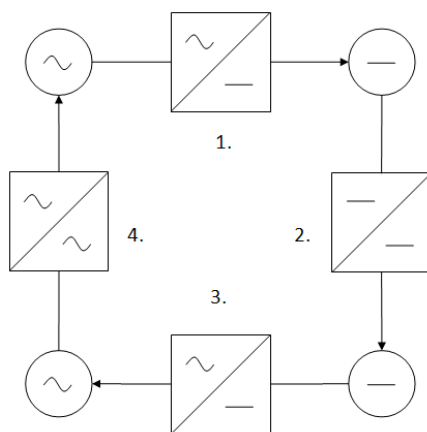
Obr. 1 – Blokové schéma mikroprocesorově řízeného pulsního usměrňovače

1.1 Základní rozdělení měničů

Polovodičové měniče slouží k přeměně parametrů elektrické energie. [1]

Na obrázku 2 je zobrazeno základní rozdělení měničů. Každý z těchto druhů měničů má své neopomenutelné výhody, které se s neustálým vývojem moderních řídicích a spínacích prvků snaží výrobci zlepšovat a naopak nevýhody co nejvíce eliminovat.

Rovněž každý z měničů pro přeměnu elektrické energie má své nenahraditelné místo v elektrotechnice a průmyslu. Ať už se jedná o napájení střídavých nebo stejnosměrných pohonů popřípadě zdroje pro spotřební elektroniku vždy se setkáme s některým z níže uvedených měničů.



Obr. 2 – Základní rozdělení měničů [1]

1. Usměrňovač
2. Stejnosměrný měnič napětí
3. Střídač
4. Střídavý měnič kmitočtu

Pulsní měniče lze využít pro tyto aplikace:

1. pro snižování napětí
2. pro zvyšování napětí
3. kombinace pro snižování a zvyšování napětí
4. pulsní řízení odporu

1.2 Pulsní usměrňovač

Pulsní usměrňovač se řadí do skupiny měničů s vlastní komutací. Z toho vyplývá, že v obvodu měniče je umístěn zdroj komutačního napětí. Hlavní předností pulsního usměrňovače, která vzniká z výhod vlastní komutace je odběr téměř sinusového proudu ze zdroje a dosažení téměř jednotkového účinku. Účinnost pulsního usměrňovače je trochu nižší než účinnost diodového usměrňovače. Tyto přídavné ztráty jsou zapříčiněny především ztrátami spínáním polovodičových prvků.[2][3][4]

Vzhledem k požadavkům na moderní napájecí zdroje, kde se klade důraz na to, aby účinník byl velmi blízko 1, nízký odběr deformačního výkonu a možnost toku výkonu ze zdroje do zátěže u některých aplikací je vhodné použití polovodičových součástek s vlastní komutací. Volbou vhodného řízení jsou tyto usměrňovače schopny upravit tvar průběhu odebíraného tvaru proudu. Pro co nejlepší využití napájecího zdroje mají schopnost kompenzovat deformační vlivy napájecího napětí.[4]

Podle použitého prvku na vstupu a výstupu měniče lze pulsní usměrňovač rozdělit na proudový pulsní usměrňovač nebo napěťový pulsní usměrňovač.

Podle mnoha dalších kritérií lze pulsní usměrňovač rozdělit do několika kategorií například:

Podle počtu fází:

- 1-fázový
- 3-fázový

Podle stejnosměrné strany:

- proudový
- napěťový

Podle konstrukce:

- s vlastní komutací
- s vnější komutací

Podle toku energie:

- jednokvadrantové
(tok energie ze zdroje do zátěže)
- dvoukvadrantové
(tok energie ze zdroje do zátěže, ze zátěže do zdroje)

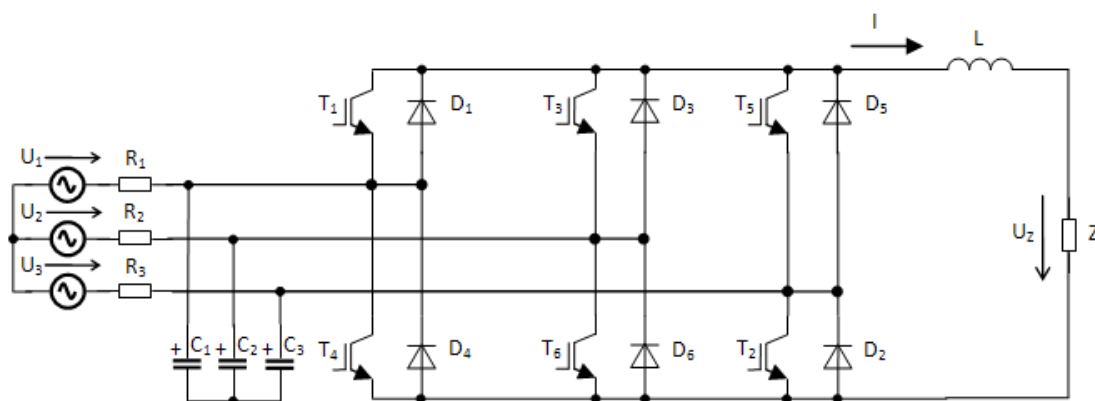
Podle počtu pulsů:

- jednopulsní
- dvoupulsní
- trojpulsní
- šestipulsní
- n-pulsní

1.2.1 Proudový pulsní usměrňovač

Proudové pulsní usměrňovače jsou nejčastěji použity pro napájení stejnosměrných motorů nebo jako zdroj proudových střídačů. Jednou z vlastností proudových pulsních usměrňovačů je průchod výkonu oběma směry. Pro správnou funkci vyžaduje zapojení vypínatelné součástky s vlastní komutací. Řízení u proudového pulsního usměrňovače je možné provést metodou PWM (pulsní šířková modulace) nebo prostřednictvím dvouhodnotového regulátoru, který sice zjednoduší algoritmus řízení avšak je zapotřebí zvolit dostatečně výkonný řídicí systém. [3][4]

Na obrázku 3. je zobrazeno obvodové schéma proudového pulsního usměrňovače, kde mezi důležité součásti patří akumulární kondenzátory na vstupu a filtrační tlumivka na výstupu.

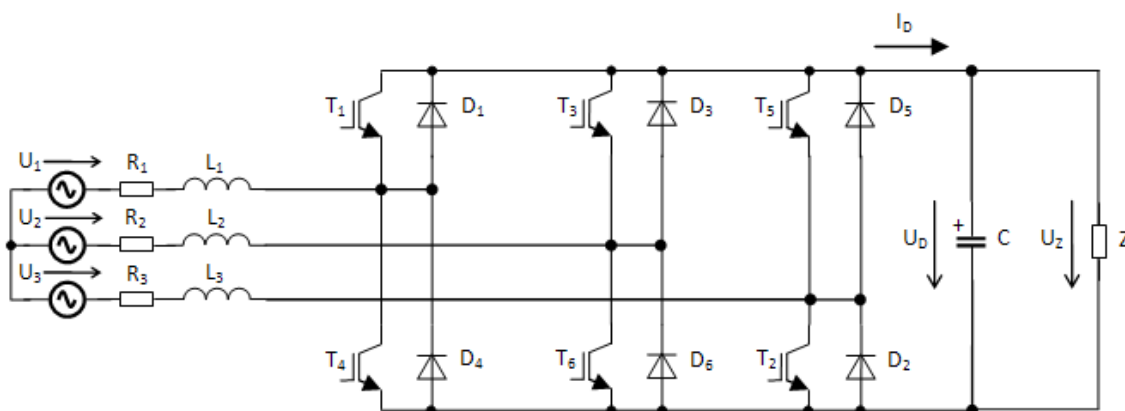


Obr. 3 – Proudový pulsní usměrňovač

1.2.2 Napěťový pulsní usměrňovač

Na obrázku 4. je zobrazen napěťový pulsní usměrňovač, který je obvodovým zapojením téměř totožný s proudovým pulsním usměrňovačem s rozdílem filtračních prvků, jak na vstupu tak výstupu. Na vstupu je umístěna rozptylová indukčnost, která reprezentuje celkovou indukčnost napájecího zdroje. V případě není-li tato indukčnost dostatečně velká pro správnou funkci usměrňovače, je nutné do obvodu připojit další indukčnost, která zajistí bezproblémový chod napěťového pulsního usměrňovače. [2] [4]

Stejnoustranná strana je charakterizována filtračním kondenzátorem, který na výstupu napěťového pulsního usměrňovače udržuje téměř konstantní napětí. Z tohoto důvodu se napěťový pulsní usměrňovač jeví jako vhodný zdroj pro napájení zařízení vyžadujících konstantní napájení, jako jsou například napěťové střídače, jimiž lze následně napájet asynchronní motory. Z důvodu regulování napětí ve velmi malém rozsahu na filtračním kondenzátoru usměrňovače je pro napájení stejnosměrných motorů zapotřebí k usměrňovači připojit pulsní měnič, jehož prostřednictvím lze regulování napětí ve větším rozsahu. [2]

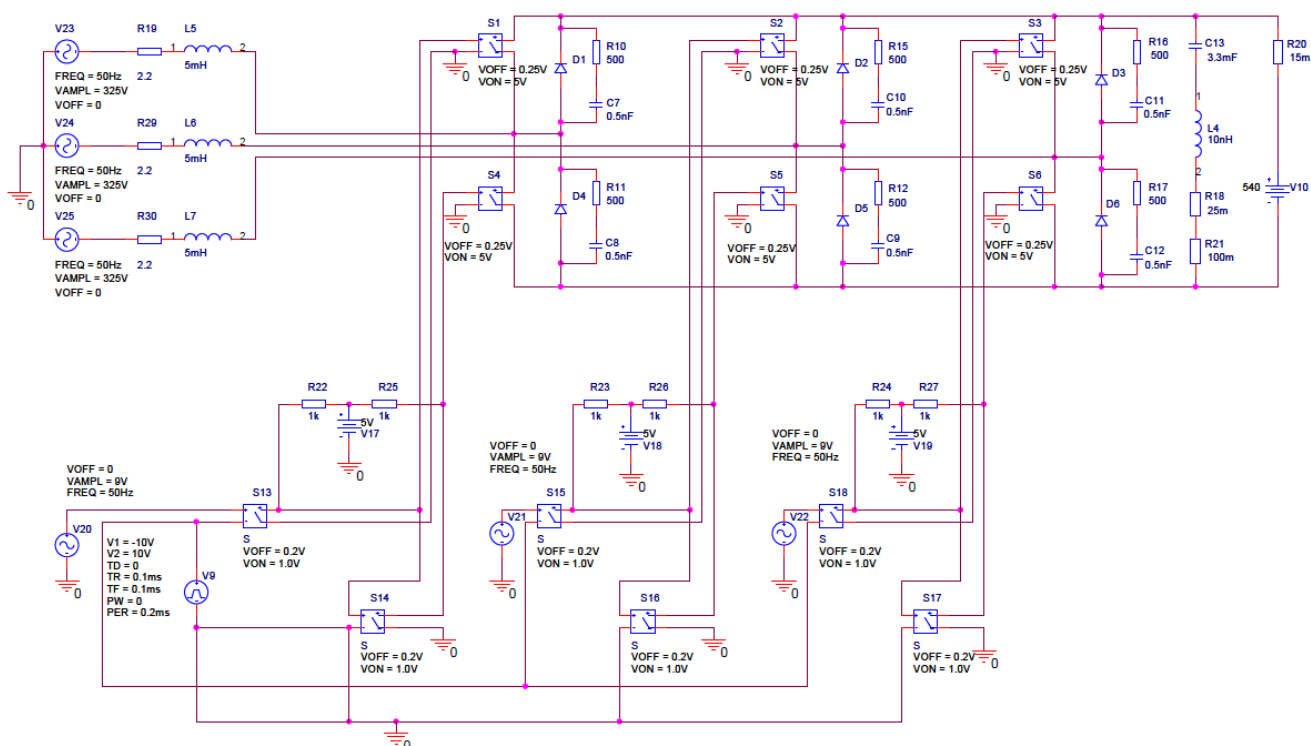


Obr. 4 – Napěťový pulsní usměrňovač

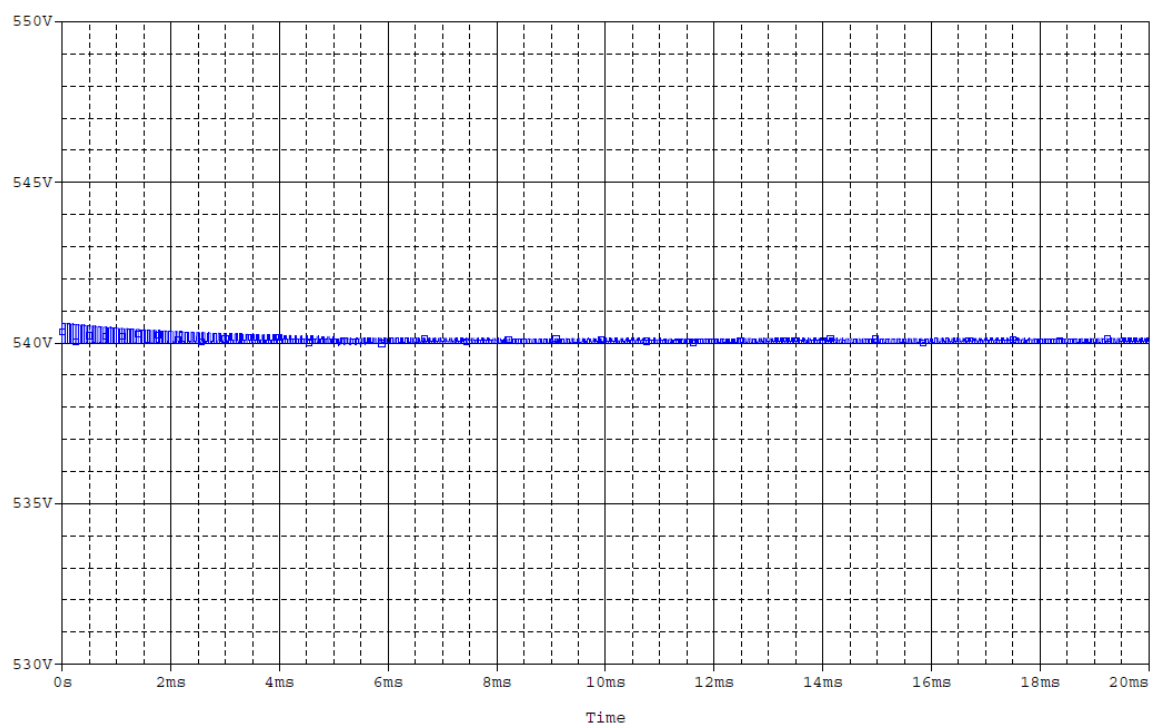
Simulace napěťového pulsního usměrňovače

Pomocí virtuálního simulačního prostředí OrCad 16. je vytvořen simulační model napěťového pulsního usměrňovače, ve kterém jsou IGBT moduly nahrazeny spínači.

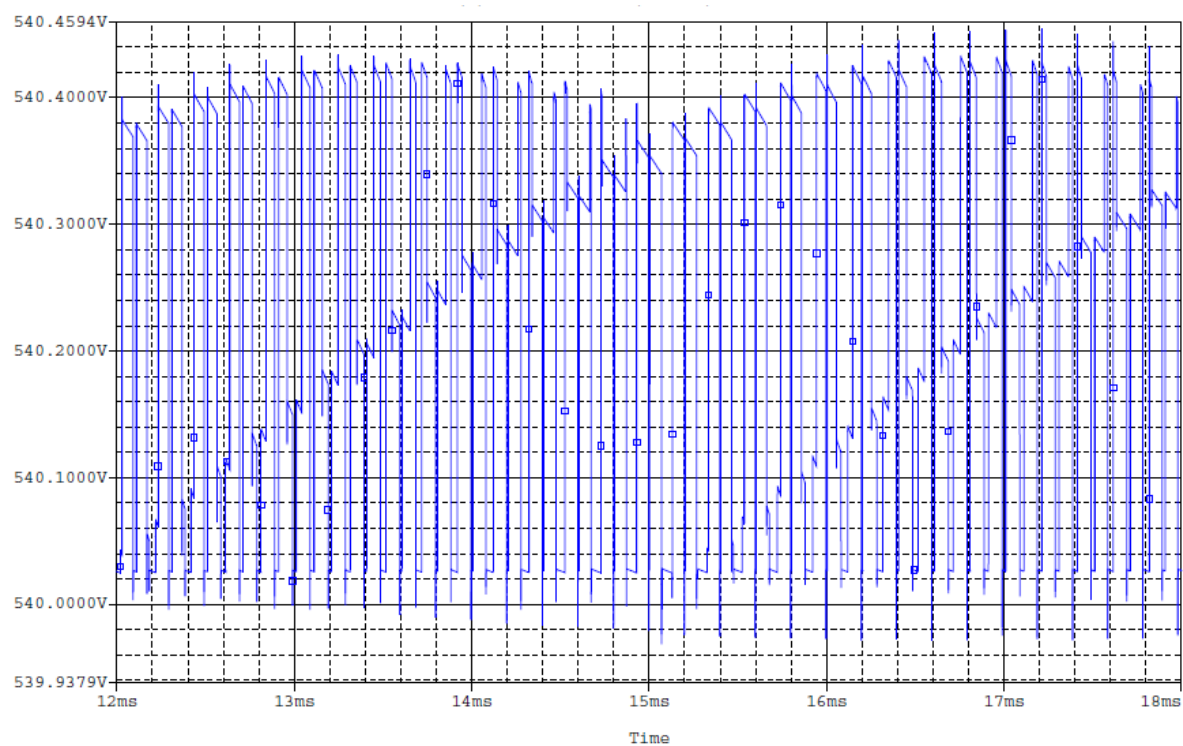
Obvodové schéma simulačního modelu z aplikace OrCad je na obrázku 5. Průběh napětí na výstupu je zaznamenán na obrázku 6 z průběhu je patrné pulsní řízení spínačů, detail tohoto průběhu je na obrázku 7.



Obr. 5 – Obvodové schéma simulačního modelu



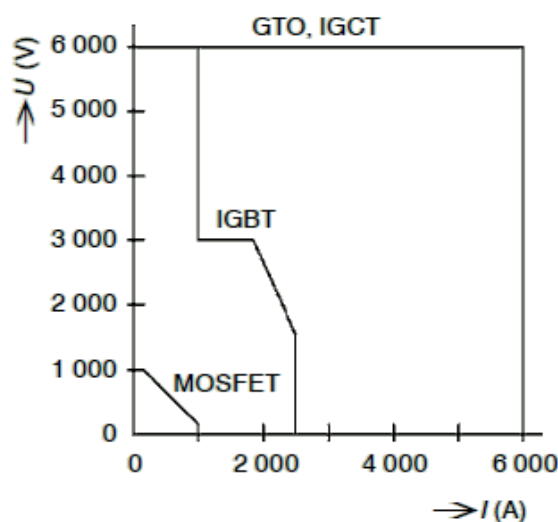
Obr. 6 – Průběh výstupního napětí



Obr. 7 – Detail výstupního napětí

1.3 IGBT

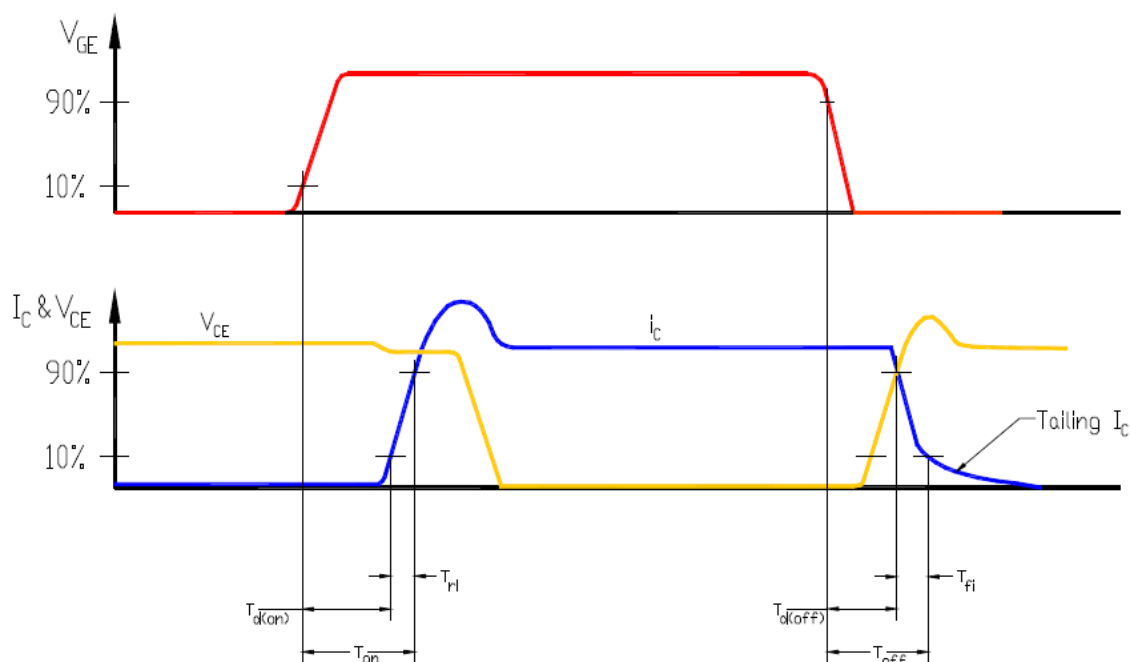
Nejčastěji osazovanými výkonovými součástkami užívanými ve výkonových měničích byly donedávna tyristory a výkonové diody, které se v usměrňovací technice užívali již od 50. let dvacátého století. Rostoucí požadavky na výkonové měniče především možnost vypnutí spínacího prvku a práce na vyšších frekvencích donutily výrobce k vývoji nových spínacích prvků. Toto vedlo k vývoji hned několika součástek mezi, které patří GTO (*Gate Turn-Off Thyristor*), IGCT (*Integrated Gate Commutated Thyristor*) a IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). V současnosti nejužívanějším prvkem ve výkonových měničích je IGBT tranzistor, jedná se o bipolární tranzistor s izolovanou řídicí elektrodou. IGBT tranzistor se díky svým vlastnostem a dalšímu vývoji v oblasti zvyšování napěťových a proudových hladin stává do budoucna perspektivní komponentou pro výkonovou elektroniku. [6]



Obr. 8. Využití výkonových polovodičových součástek [6]

Vývoj IGBT tranzistoru byl od počátku zaměřen na spojení výhod bipolárních a FET tranzistorů s využitím ve výkonových aplikacích. „Vstupní strana“ součástky (gate) má vlastnosti přirovnatelné k FET tranzistorům, „výstupní strana“ (kolektor, emitor), která zabezpečuje vedení proudu má vlastnosti tranzistorů bipolárních. IGBT tranzistory jsou říditelné pouze napěťovým signálem a mohou dosahovat velkých spínacích frekvencí. Rychlost spínaná v řádech desetin μs , je podstatně ovlivněna dobou nabíjení kapacity řídicí elektrody. [6]

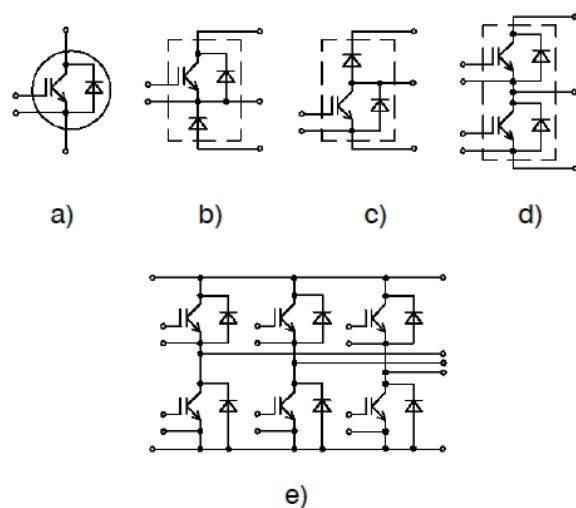
Bezpečný pracovní úsek IGBT tranzistoru je omezen především tepelnými ztrátami, které se odvíjí také od spínací frekvence. Důležité je také dodržet minimální dobu, při které tranzistor zůstane v sepnutém nebo vypnutém stavu.



Obr. 9. Průběhy napětí a proudu při sepnutí a vypnutí tranzistoru [7]

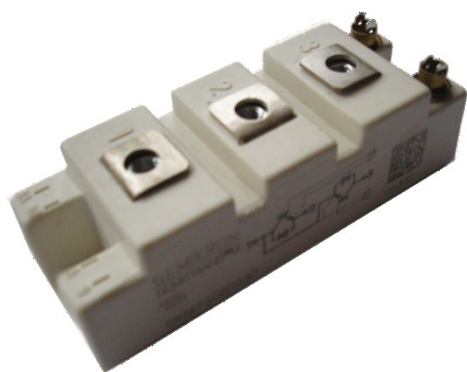
Konstrukčně se prvky IGBT vyrábějí v podobě bezpotenciálových modulů, jejichž výhodou je bezpotenciálový styk s plochou chladiče a možnost integrování více obvodů na jednom chladiči. Technologický postup při výrobě IGBT modulů se zakládá na řazení většího množství dílčích prvků na několika čípech s omezenou plochou. Tyto čipy jsou následně propojeny drátky. Složitost tohoto zapojení se odvíjí zejména na velikosti proudu, který modulem protéká. Bezpotenciálové moduly rovněž zajišťují elektrické odizolování výkonových prvků a maximální tepelnou vodivost pro dosažení co nejkvalitnějšího odvodu ztrátového tepla.[6]

Bezpotenciálové moduly se dnes vyrábí v různých provedeních zapojení vnitřní struktury. Na obrázku 10 jsou vyobrazeny zapojení spínacích polovodičových součástek v běžně dostupných modulech.

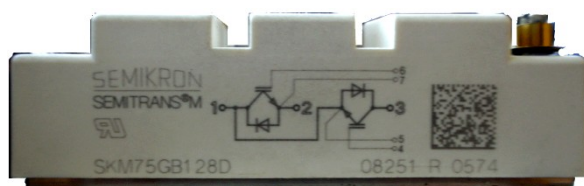


Obr. 10. Provedení vnitřního zapojení modulů [6]

Modul firmy Semikron typ SKM 75BG128D vyhovuje požadavkům na polovodičové prvky a svou vnitřní strukturou umožňuje kompaktnější a na prostor úspornější montáž.



a)



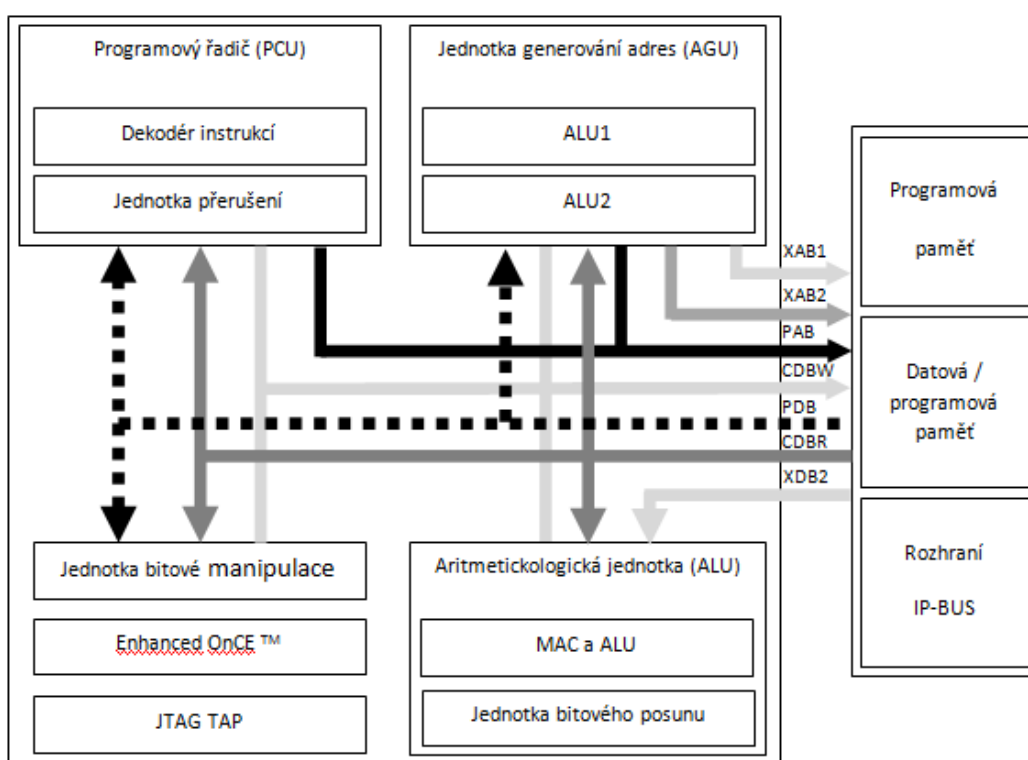
b)

Obr. 11. Modul SKM 75BG128D

2 Řídicí a měřicí část pulsního usměrňovače

2.1 Řídicí jednotka Freescale

K řízení mikroprocesorem řízeného pulsního usměrňovače je vybrán digitální signálový kontrolér DSC 56F8037 od firmy Freescale. Tento tip vychází z modelové řady 56F800E která je založena na dvojité harvardské architektuře. Na jednom čipu se tak nachází DSP (Digital Signal Procesor) a MCU (Microcontroller unit). Na obrázku 11 je vyobrazeno blokové schéma jádra této modelové řady.



Obr. 12. Blokové schéma jádra 56800E

Použitý mikrokontrolér disponuje velkým množstvím periférií, mezi které patří: PWM, ADC, DAC, PITs, QSCIs, QSPIs, MSCSN, I2C, COP, analogový komparátor. Tyto periférie lze dle potřeby libovolně aktivovat nebo deaktivovat.

✚ Základní popis mikrokontroléru

- až 32 MIPS (milionů instrukcí za vteřinu) na frekvenci jádra 32 MHz
- 64 KB Flash programové paměti
- 8 KB paměti RAM pro data/program

Jeden multifunkční PWM modul se šesti výstupy

- až 96MHz PWM
- rozlišení 15 bitů
- zarovnání na střed a kraj signálu
- čtyři programovatelné vstupy poruch s digitálním filtrem

PWM modul lze nastavit na tři vzájemně se doplňující páry, šest nezávislých PWM signálů nebo na jejich kombinace, například jeden doplňující se pár a čtyři nezávislé. 15bitový PWM čítač je společný pro všech šest kanálů. Každý z výstupu PWM lze ovládat pomocí PWM generátoru umístěném v programovém nástroji QuickStart.[10]

Dva 12bitové nezávislé A/D převodníky

- 2 x 8 vstupních kanálů
- podpora simultánního a sekvenčního převodu
- A/D převod lze synchronizovat s PWM časovým modulem
- vzorkovací frekvence až 2.67 MSPS
- výsledek v 16bitech

Analogově digitální převodník je jednou z nejdůležitějších periférií mikropočítačem zajišťující styk s analogovým prostředím. Převodník má 2x8 kanálů připojeny přes dva samostatné převodníky které ukládají své výsledky ve vyrovnávací paměti. Napěťový rozsah je $\pm 10V$. [10]

Dva 12bitové D/A převodníky

- automatické generování signálu o průběhu čtverec, trojúhelník a pila s možností nastavit periodu, rozsah a frekvenci

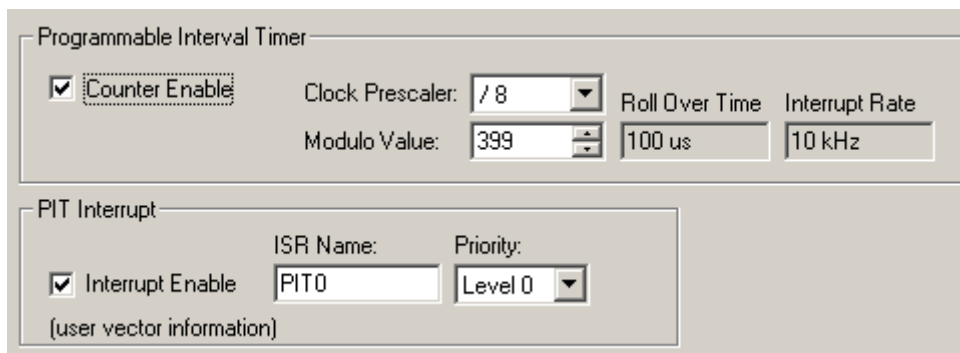
D/A převodník zpracovává 12bitový digitální signál a vytváří analogový proměnlivý výstup. D/A převodník se skládá z převodníkové jednotky, výstupního zesilovače a souvisejících digitální řídicích subsystémů. D/A periferie jsou optimalizovány pro nízký výkon a kompaktnost.[10]

Dva 16bitové víceúčelové moduly časovače

- až 96MHz
- osm 16bitových nezávislých čítačů/časovačů
- možnost zachycení a porovnání hodnoty jednotlivého časovače
- až 12 provozních režimů

Programovatelný časovač intervalů (PIT)

Programovatelný časovač intervalů slouží pro generování přesných časových intervalů. Nejčastěji se tento časovač využívá pro přerušování systému. Programový nástroj QuickStart zjednodušuje nastavení časovače a rovněž zobrazí vypočtenou hodnotu frekvence a periodu.[13]



Obr. 13 – Nabídka QuickStart pro programovatelný časovač intervalů

JTAG/EOnCE

- programovací rozhraní pro ladění programu v reálném čase

Jádro série 56800E obsahuje vlastní testovací přístupový port. Tento port poskytuje přístup k EOnCE modulu a obvodům pro ovládání systému.

Pro správnou funkčnost komponentů desky je zapotřebí zajistit vhodné napájení:

- napájení mikroprocesoru 3,3 V
- napájení operačních zesilovačů ± 15 V
- referenční napětí pro OZ 1,65 V
- napájení budičů PWM 5 V

Popis jednotlivých částí jádra

- **Adresové sběrnice**

- PAB – přístupová sběrnice pro přístup do programové paměti
- XAB1 – primární adresová sběrnice datové paměti
- XAB2 – sekundární adresová sběrnice datové paměti

- **Datové sběrnice**

Slouží pro přesuny dat na čipu

- CDBR – obousměrná 32bitová sběrnice pro čtení dat
- CDBW – obousměrná 32bitová sběrnice pro zápis dat
- XDB2 – sekundární obousměrná 16bitová datová sběrnice
- PDB – obousměrná 16bitová datová sběrnice programu

- **Programový řadič**

Programový řadič zpracovává instrukce a přerušení. Obstarává také hardwarové blokování a hardwarové smyčky. Aktuální instrukce vkládá do dalších částí jádra jako například do aritmetickologické jednotky, jednotky generování adres nebo jednotky bitové manipulace.[13]

- **Jednotka generování adres (AGU)**

Jednotka generování adres provádí výpočty efektivních adres pro datové operandy. AGU obsahuje dvě aritmetickologické jednotky, které provádějí zpracování adres a v každém instrukčním cyklu generují dvě 24bitové adresy. AGU dokáže pracovat nezávisle na ostatních blocích jádra a tím minimalizuje jeho zatížení.

- **Datová aritmetickologická jednotka (ALU)**

Aritmetickologická jednotka provádí veškeré aritmetické a logické operace, obstarává také posuv datových operandů. V jednom instrukčním cyklu lze provést násobení, sčítání, odčítání, posuvy a logické operace. Dělení je prováděno prostřednictvím iteračních instrukcí. Výsledky jednotlivých výše uvedených operací jsou uloženy v jednom z aritmetickologickém registru nebo přímo v datové paměti.

- **Jednotka bitové manipulace**

Tato jednotka provádí bitové operace periferními registry a registry uvnitř jádra. V rámci 16bitového slova je tato jednotka bitové manipulace schopná s jednotlivými bity nebo skupinou bitů provádět testování, nastavování, mazání popřípadě inverzi.

2.1.1 Principy řízení pulsního usměrňovače

Řízení polovodičových měničů lze uskutečnit několika metodami, při kterých se řízení zajišťuje změnou poměrné doby sepnutí polovodičových součástek.

Mezi tyto metody patří řízení:

- s konstantním kmitočtem spínání
- s konstantní dobou sepnutí
- řízení dvouhodnotové

2.1.1.1 Řízení s konstantním kmitočtem spínání

Tento způsob řízení se provádí změnou poměrné doby sepnutí při konstantním kmitočtu spínání. Řízení je závislé od porovnávání generovaného pilovitého signálu s řídicím napětím. Spínač je sepnut při poklesu pilovitého napětí k nule v době rovnosti signálů je spínač rozepnut. Se změnou řídicího napětí se mění poměrná doba sepnutí. Řízení je možné provádět i číslicově za pomoci mikroprocesorové techniky.[2]

2.1.1.2 Řízení s konstantní dobou sepnutí

Metoda spočívá v zajištění konstantní hodnoty periody, kdy se řízení provádí změnou kmitočtu. Tento způsob vyžaduje k vypnutí polovodičové součástky komutační obvod. Řídicí impulsy se přivádějí na jediný spínač. Při sepnutí spínače je aktivován komutační obvod, který je za dobu periody vypnut a tím tak komutační obvod šetří vedlejší spínač.[2]

2.1.1.3 Řízení dvouhodnotové

Metoda udržuje okamžitou hodnotu výstupního proudu konstantní. Blok řízení porovnává vstupní hodnotu proudu s hodnotou žádanou. Při tomto řízení dochází ke změně kmitočtu a poměrné doby spínání. Důležitou částí bloku řízení je klopný obvod porovnávající vstupní napěťové signály úměrné žádané a skutečné hodnotě proudu. Z porovnání těchto napětí se

generují zapínací a vypínací pulsy. U dvouhodnotového řízení není možný chod s přerušovaným proudem. Dvouhodnotovou metodu lze realizovat pomocí mikroprocesoru.[2]

Srovnání

Nejčastěji používaným řízením je s konstantním kmitočtem. Tato metoda dokáže eliminovat dopad rušivých vlivů spínání na telekomunikační síť. Další dvě varianty mají proměnný kmitočet spínání a tím je odrušení náročnější. Dvouhodnotové řízení plní také funkci proudového regulátoru. Metoda s konstantní dobou sepnutí je využívána především z důvodu úsporného řešení komutačního obvodu.[2]

2.1.2 Pulsně – šířková modulace

S vývojem nových a výkonnějších mikroprocesorových systémů a signálových procesorů bylo možné zefektivnit metody řízení pro dosažení lepších vlastností polovodičových měničů. Nejčastěji používanou metodou pro řízení polovodičových měničů je pulsně - šířková modulace PWM, při které dochází k sepnutí jednoho spínače v každé větvi. Z tohoto vyplývá, že existuje 6 možností spínání včetně dvou takzvaných nulových stavů, kdy jsou sepnuty tři stejně umístěné spínače po jednom v každé větvi (T1, T3, T5 nebo T2, T4, T6). [2][14]

2.1.2.1 Vektorová pulsně - šířková modulace

Tato metoda vychází ze stejných předpokladů, které jsou kladeny na vektorové řízení střídačů. Při vektorové pulsně – šířkové modulaci dochází k realizaci vypočtené polohy a velikosti prostorového vektoru napětí. Hodnota polohy napětíového vektoru představuje kombinace jednotlivých sepnutých a rozepnutých spínačů, přičemž velikost napětíového vektoru reprezentuje doba vypočtená pro sepnutí, případně vypnutí spínačů.

Využitím výhod signálových procesorů lze spínací doby výkonových prvků určit velice rychle. Tyto procesory zajišťují také vysoké spínací frekvence, řádově v desítkách kHz z čehož plyne možnost maximálního napětíového využití.

Pro každou z osmi kombinací napětíového vektoru platí:

$$u_k = \begin{cases} \frac{2}{3} U_d e^{\frac{j(k-1)\pi}{3}} & k = 1, 2, \dots, 6 \\ 0 & k = 0, 7 \end{cases} \quad (V; V, -) \quad (1)$$

Ze vzorce je patrné že hodnota vektorů u_1 až u_6 je $2/3 U_d$ a pro vektory u_0 a u_7 je tato hodnota nulová. [14]

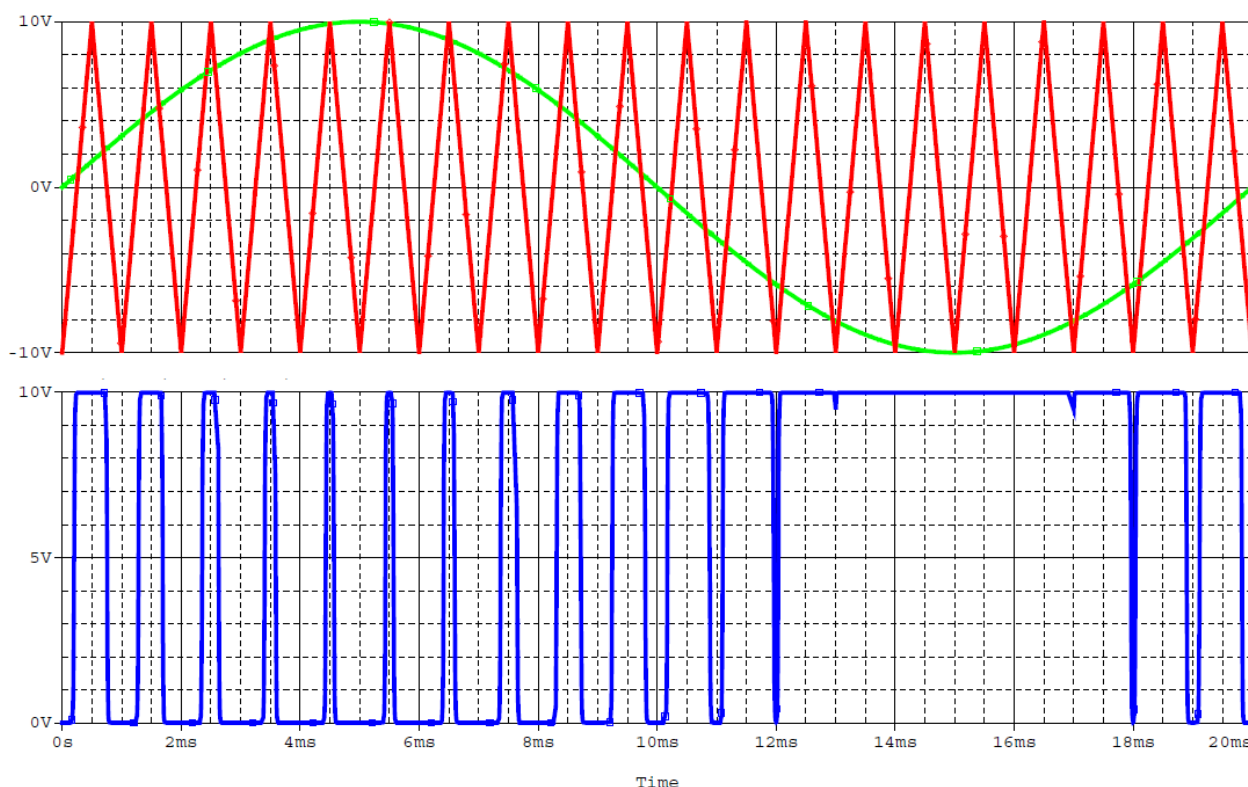
2.1.2.2 Komparační pulsně – šířková modulace

Komparační pulsně – šířková modulace je vytvořena porovnáním sinusového referenčního napětí U_{REF} o referenční frekvenci f_{REF} s trojúhelníkovým signálem o amplitudě U_T a frekvenci f_T . Dosáhnou-li signály totožné hodnoty je vygenerován impuls s proměnlivou šířkou pro sepnutí daného spínače v příslušné větvi usměrňovače. Spínací frekvence je odvozena od referenční frekvence trojúhelníkového signálu. Jedná-li se o třífázový usměrňovač je zapotřebí tří referenčních sinusových napětí s totožnou frekvencí.

Tato metoda se také nazývá PWM s přirozeným vzorkováním. Toto řízení není vhodné pro používání s mikroprocesorovými systémy, ve kterých se využívá pravidelného vzorkování, jehož parametry lze stanovit analyticky. [14]

Modulační frekvenční poměr:

$$n_p = \frac{f_s}{f_{REF}} \quad (-; \text{Hz}, \text{Hz}) \quad (2)$$

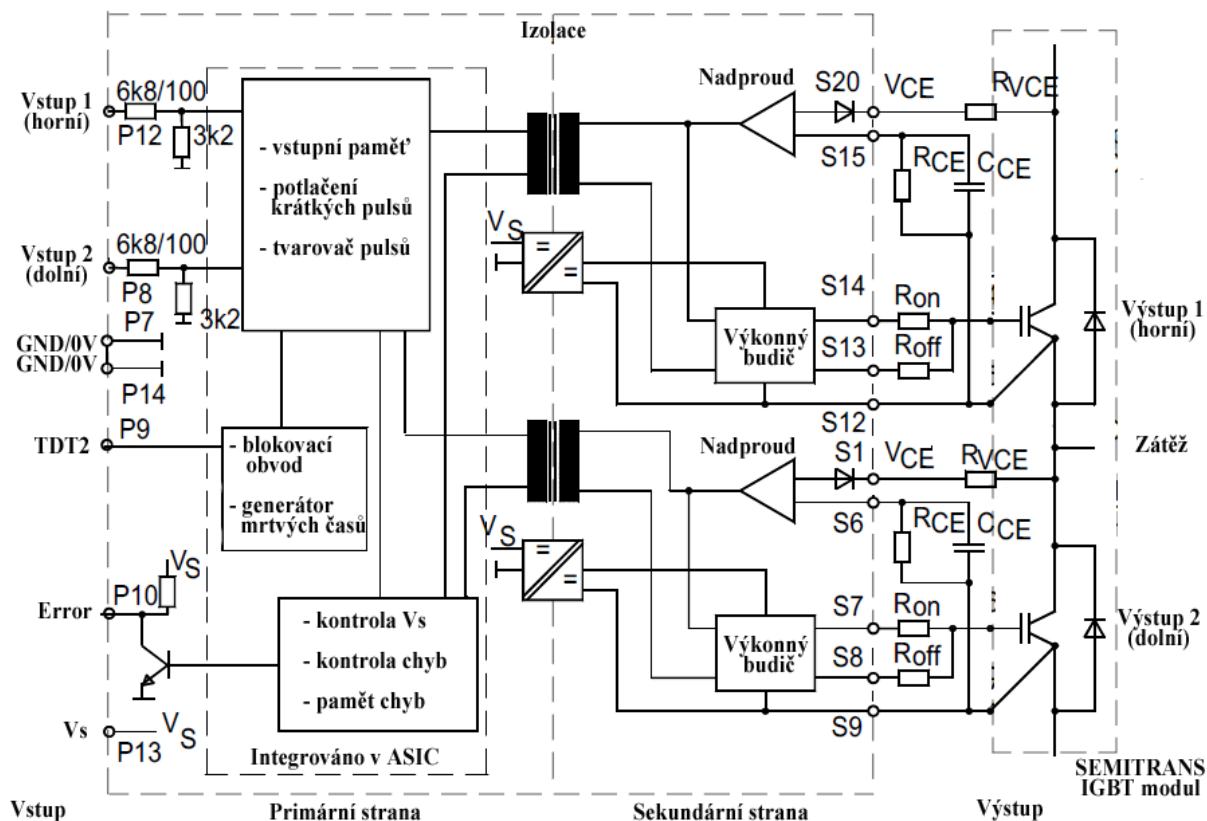


Obr. 14 – Komparační pulsně – šířková modulace

Červený průběh – trojúhelníkový signál $f = 1 \text{ kHz}$
Zelený průběh – sinusový referenční signál $f = 50 \text{ Hz}$
Modrý průběh – výsledný průběh pulsně – šířkové modulace

2.2 Budiče IGBT

Pro spínání IGBT tranzistorů jsou zapotřebí budiče zajišťující bezpečný chod polovodičových modulů. Typ budiče SKHI22AH4 firmy Semikron je schopen spínat oba IGBT tranzistory v jednom modulu. Zjednodušený popis funkcí je pod obrázkem 15, na kterém je zobrazeno blokové schéma budiče.



Obr. 15 – Blokové schéma budiče [9]

🚦 Funkce na primární straně budiče: [8][9]

- **Vstupní Schmittův klopný obvod**

IGBT sepnut při log. 0

- **Blokovací obvod**

Zabraňuje sepnutí obou tranzistorů najednou.

- **Generátor mrtvých časů**

Zajišťuje potřebný čas pro bezpečné rozepnutí tranzistoru před sepnutím druhého, tento čas je v budiči pevně nastaven na dvě hodnoty 3,25μs nebo 4,25μs

- **Potlačení krátkých pulsů**
Slouží k potlačení krátkých pulsů způsobenými vysokofrekvenčním rušením na vstupním signálu.
- **Kontrola napájecího napětí**
Kontrola vlastního napájecího napětí, pokles napětí pod 13V je vyhodnocen jako chyba.
- **Kontrola chyb a paměť chyb**
Je určena pro kontrolu nadproudu a v případě poruchy k blokaci všech spínacích pulsů pro IGBT.
- **Pulsní transformátory**
Pulsní transformátory jsou vhodné přenosu informací do příslušných budících stupňů. Jejich výhodou je menší citlivost na šum a dosahují vyšší izolační schopnosti. Jeden z dvojice pulsních transformátorů slouží jako DC/DC měnič pro galvanické oddělení a napájení sekundární strany budiče. Druhy pulsní transformátor slouží pro zapínací a vypínací signály IGBT.

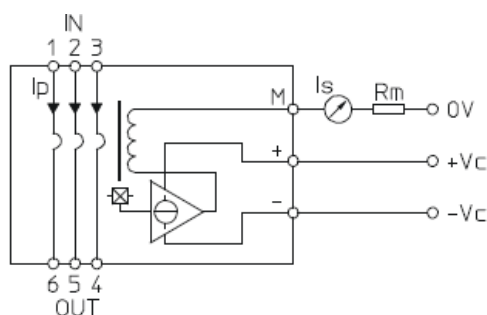
Funkce na sekundární straně budiče:

- **Napájecí napětí**
Napěťový zdroj je složen z usměrňovače, kondenzátoru a napěťového regulátoru pro napětí -7 V, +15 V a +10 V referenčního napětí.
- **Sledování napětí U_{CE} , saturační ochrana**
Obvod sleduje napětí U_{CE} během spínání a v sepnutém stavu. Překročí-li sledované napětí, napětí referenční U_{CEref} je tranzistor vypnut.
- **Budič gate IGBT**
Výstupní tranzistory budiče jsou typu MOSFET a jsou odděleně připojeny k vnějším výstupům budiče. Tímto zapojením společně s rezistory R_{ON} a R_{OFF} lze zajistit požadovanou délku sepnutí modulů.

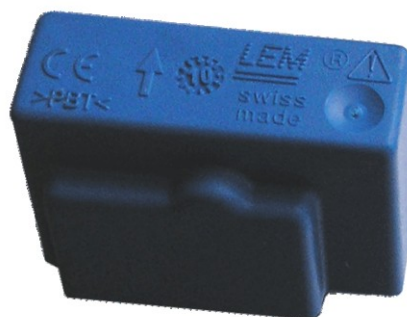
2.3 Čidla

K měření vstupních a výstupních proudů a napětí jsou použity čidla švýcarské firmy LEM.

Pro měření proudu jsou použita čtyři čidla typu LAH 25-NP z nichž tři měří vstupní proudy jednotlivých fází tekoucí do modulů a jedno čidlo měří proud tekoucí do kondenzátorové baterie. K měření napětí jsou použita čtyři čidla typu LV 25-P, která snímají napětí na vstupních fázích a kondenzátorové baterii. Oba typy čidel pracují na principu Hallova efektu s uzavřenou smyčkou.



a)

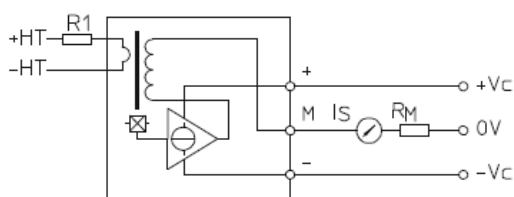


b)

Obr. 16 – Proudové čidlo LAH 25-PN

a) vnitřní zapojení čidla

b) fyzická podoba čidla



a)



b)

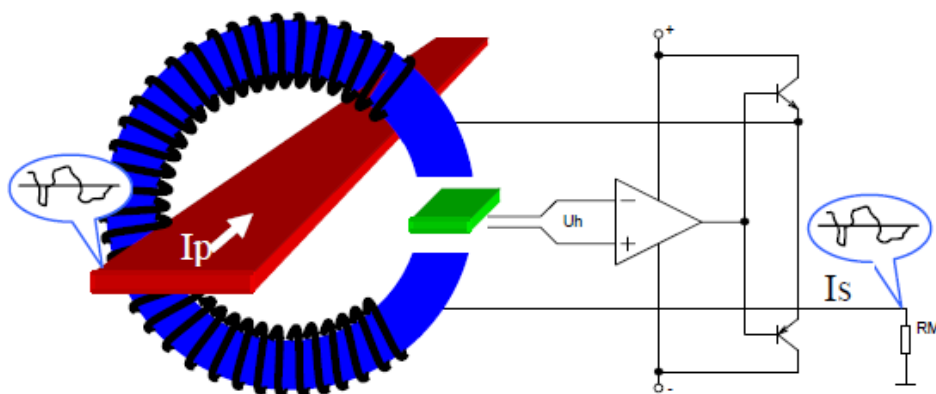
Obr. 17 – Napěťové čidlo LV25-P firmy LEM

a) vnitřní zapojení čidla

b) fyzická podoba čidla

✚ Princip proudového čidla

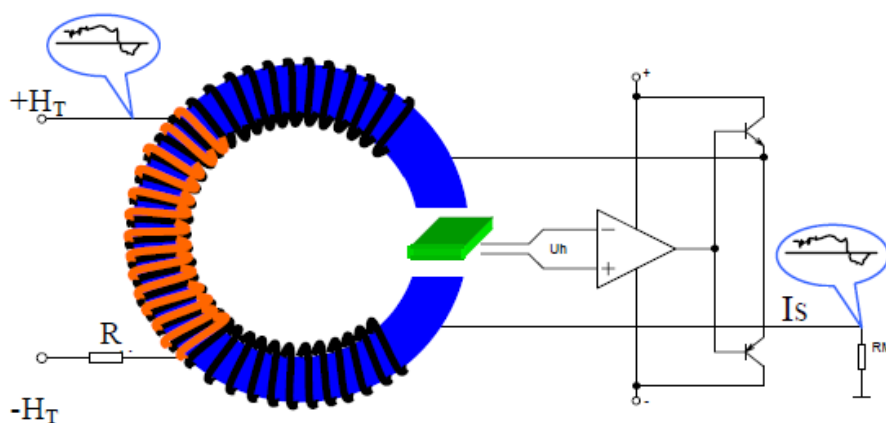
Proud tekoucí magnetickým obvodem vytváří magnetický tok, díky němuž vzniká na Hallově generátoru umístěném ve vzduchové mezeře napětí úměrné toku. Toto napětí putuje do zesilovače, který proudově napájí kompenzační vinutí k vytvoření sekundárního magnetického toku, který je v poměru závitů primární a sekundární strany totožný s primárním magnetickým tokem.



Obr. 18 – Princip proudového čidla [8]

✚ Princip napěťového čidla

Princip se nikterak neliší od principu proudového čidla s drobným rozdílem a to ve větším počtu primárních závitů.



Obr. 19 – Princip napěťového čidla[8]

3 Dimenzování komponent

3.1 Chlazení

Volba chladiče je jednou z nejdůležitějších částí při návrhu polovodičového měniče. Zvolený chladič musí zvládnout dostatečně odvádět vzniklý ztrátový výkon proměněný na teplo z místa jeho vzniku. Nebude-li odvod tepla dostačující, dojde ke zhoršení vlastností chlazené součástky nebo i k jejímu zničení. Pouzdro součástky je ve většině případů nedostačující k odvodu tepla a proto se musí zvolit vhodný chladič.

✚ Na výběr jsou k dispozici chladiče v různém provedení:

- **Deskové chladiče**

Jsou vyrobené z mědi nebo hliníku. Určené především pro menší výkony.

- **Profilové chladiče**

Nejrozšířenější jsou vzduchové, vyrobené ze slitiny hliníku a anodický oksyločeným povrchem.

- **Kapalinové chladiče**

Využívají nucený oběh chladicího média.

- **Chladiče na bázi tepelné trubice**

Využívané v kombinaci s nuceným chlazením vzduchem.

✚ Dále se rozdělují podle montáže:

- jednostranné
- oboustranné

✚ Podle typu chlazení:

- chlazení přirozené
- chlazení nucené

Bezporuchovou činnost lze zajistit co nejmenším tepelným odporem mezi pouzdem a chladičem. Tento parametr je ovlivnitelný hned několika způsoby. Co nejnižší hodnotu lze docílit využitím celé kontaktní plochy součástky, čistotou, hladkostí stykových ploch, pokrytím dosedacích ploch tepelně vodivou pastou.

Pro správný výběr chladiče je nutné nejprve určit ztrátový výkon měniče.

3.1.1 Určení ztrát pulsního usměrňovače

Parametry měniče

$f_s = 10 \text{ kHz}$	Spínací frekvence měniče
$I_n = 14,5 \text{ A}$	Vstupní jmenovitý proud
$U_n = 230 \text{ V}$	Vstupní napájecí napětí jedné fáze měniče
$U_c = 540 \text{ V}$	Napětí v meziobvodu
$z_u = 0,75$	Poměr spínání tranzistoru k periodě

Parametry zvoleného IGBT modulu

IGBT tranzistor

$R_{Gon} = 6 \Omega$	Odpor na gate tranzistoru v sepnutém stavu
$t_r = 160 \text{ ns}$	Čas potřebný pro sepnutí tranzistoru
$t_f = 310 \text{ ns}$	Čas potřebný pro rozepnutí tranzistoru

Antiparalelní dioda

$U_{F0} = 1,2 \text{ V}$	Hradlové napětí naprázdno
$r_f = 26 \text{ m}\Omega$	Diferenciální propustný odpor

Určení středních a efektivních hodnot proudu tekoucího jednotlivými součástkami

$$I_{(av)} = \frac{1}{T} \int_0^t I_n \sin \omega t \, d\omega t = \frac{\sqrt{2} I_n}{T} [-\cos \omega t]_0^\pi \quad (\text{A; s, A, -}) \quad (3)$$

$$I_{(av)T} = z_u \frac{\sqrt{2} I_n}{T} [-\cos \omega t]_0^\pi = 0,75 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 14,5}{2\pi} \cdot 2 = 4,89 \text{ A}$$

$$I_{(av)D} = (1 - z_u) \frac{\sqrt{2} I_n}{T} [-\cos \omega t]_0^\pi = 0,25 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 14,5}{2\pi} \cdot 2 = 1,63 \text{ A}$$

$$I_{(rms)}^2 = \left(\frac{I_n}{2} \right)^2 \quad (\text{A}^2; \text{A}) \quad (4)$$

$$I_{(rms)D}^2 = (1 - z_u) \left(\frac{I_n}{2} \right)^2 = 0,25 \left(\frac{14,5}{2} \right)^2 = 13,14 \text{ A}^2$$

Určení ztrátového výkonu tranzistoru

$$W_{onT} = \frac{I_n \cdot U_n \cdot t_r}{2} = \frac{14,5 \cdot 325 \cdot 160 \cdot 10^{-9}}{2} = 0,46 \text{ mJ} \quad (\text{mJ; A, V, s}) \quad (5)$$

$$W_{offT} = \frac{I_n \cdot U_c \cdot t_f}{2} = \frac{20 \cdot 540 \cdot 310 \cdot 10^{-9}}{2} = 1,21 \text{ mJ} \quad (\text{mJ; A, V, s}) \quad (6)$$

$$P_{(TOT)T} = R_{Gon} \cdot I_{(av)T} + (W_{onT} + W_{offT}) \cdot f_s \quad (\text{W; } \Omega, \text{ A, J, Hz}) \quad (7)$$

$$P_{(TOT)T} = 6 \cdot 4,89 + (0,46 \cdot 10^{-3} + 1,21 \cdot 10^{-3}) \cdot 10000 = 46,13 \text{ W}$$

Určení ztrátového výkonu antiparalelní diody

$$P_{(TOT)D} = U_{F0} I_{(av)D} + r_f I_{(rms)D}^2 \quad (\text{W; V, A, } \Omega, \text{ A}^2) \quad (8)$$

$$P_{(TOT)D} = 1,2 \cdot 1,63 + 26 \cdot 10^{-3} \cdot 13,14 = 2,29 \text{ W}$$

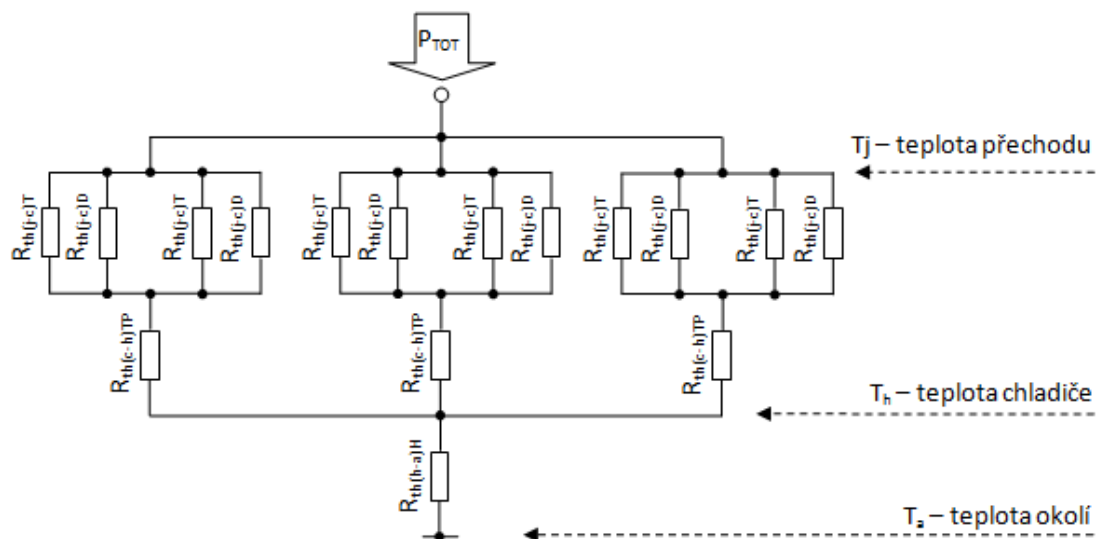
Vypočtené hodnoty se vztahují pouze k jednomu IGBT tranzistoru a jemu patřící antiparalelní diodě. V modulu se nacházejí dvě tyto dvojice.

✚ Určení celkového ztrátového výkonu

$$P_{(TOT)} = (2 \cdot P_{(TOT)T} + 2 \cdot P_{(TOT)D}) \cdot 3 \quad (\text{W; W, W}) \quad (9)$$

$$P_{(TOT)} = (2 \cdot 46,13 + 2 \cdot 2,29) \cdot 3 = 290,58 \text{ W}$$

3.1.2 Výpočet chladiče



Obr. 20 – Náhradní elektrické schéma pro výpočet tepelných ztrát

Katalogové údaje

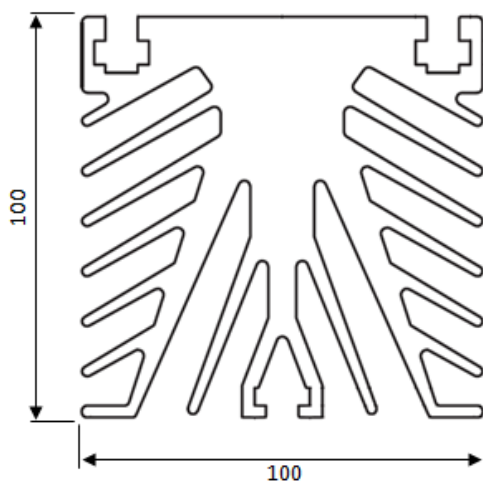
$R_{th(j-c)T} = 0,3 \text{ K/W}$	Tepelný odpor, PN přechod – pouzdro tranzistoru
$R_{th(j-c)D} = 0,6 \text{ K/W}$	Tepelný odpor, PN přechod – pouzdro diody
$R_{th(c-h)TP} = 0,005 \text{ K/W}$	Tepelný odpor teplovodivé pasty, pouzdro – chladič
$T_a = 40^\circ\text{C}$	Teplota okolí

Tepelný odpor sestavy modulů:

$$R_{th\Sigma} = \frac{\frac{R_{th(j-c)T} \cdot R_{th(j-c)D}}{2 \cdot (R_{th(j-c)T} + R_{th(j-c)D})} + R_{th(j-c)TP}}{3} \quad (\text{K/W}; \text{K/W}) \quad (10)$$

$$R_{th\Sigma} = \frac{\frac{0,3 \cdot 0,6}{2 \cdot (0,3 + 0,6)} + 0,005}{3} = 0,035 \text{ K/W}$$

Chladič musí být zvolen tak, aby nedošlo k překročení maximální hodnoty teploty PN přechodu součástky. Tato hodnota je u IGBT tranzistoru v modulu SKM 75GB128D výrobcem určena na 150°C. Zvolený chladič společnosti Polovodiče a.s, L140 typ 34.2 s nuceným chlazením má tepelný odpor přechodu chladič okolí $R_{th(h-a)H} = 0,185 \text{ K/W}$



Obr. 21 – Profil zvoleného chladiče

Kontrolní výpočty pro ověření správného výběru chladiče

Tepelná ztráta na přechodu chladič - okolí

$$T_{h-a} = R_{th(h-a)H} \cdot P_{TOT} \quad (^\circ\text{C}; \text{K/W}, \text{W}) \quad (11)$$

$$T_{h-a} = 0,185 \cdot 290,58 = 53,75^\circ\text{C}$$

Teplota povrchu chladiče

$$T_h = T_a + T_{h-a} \quad (^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}) \quad (12)$$

$$T_h = 40 + 53,75 = 93,75^\circ\text{C}$$

Tepelná ztráta na přechodu PN přechod - chladič

$$T_{j-h} = (R_{th\Sigma} + R_{th(h-a)H}) \cdot P_{TOT} \quad (^\circ\text{C}; \text{K/W}, \text{K/W}, \text{W}) \quad (13)$$

$$T_{j-h} = (0,035 + 0,185) \cdot 290,58 = 63,92^\circ\text{C}$$

Teplota PN přechodu

$$T_j = T_a + T_{j-a} \quad (^\circ\text{C}; ^\circ\text{C}, ^\circ\text{C}) \quad (14)$$

$$T_j = 40 + 63,92 = 103,92 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Z výpočtu je patrné, že teplota přechodu T_j není překročena a zvolený chladič lze v měniči použít za předpokladu spínací frekvence 10kHz a maximálního vstupního proudu 20 A.

3.2 Kondenzátorová baterie

$P = 5500 \text{ W}$ Výkon měniče

$U_{\max} = 545$ Maximální napětí na meziobvodu

$U_{\min} = 535$ Minimální napětí na meziobvodu

$p = 6$ Počet pulsů v jedné periodě

✚ Výpočet vlastního kmitočtu šestipulsního usměrňovače

$$f_{REC} = f * p \quad (\text{Hz}; \text{Hz}, -) \quad (15)$$

$$f_{REC} = 50 * 6 = 300 \text{ Hz}$$

✚ Výpočet minimální kapacity kondenzátorové baterie

$$C_{\min} = \frac{2 * P}{(U_{\max}^2 - U_{\min}^2) * f_{REC}} \quad (\text{mF}; \text{W}, \text{V}, \text{V}, \text{Hz}) \quad (16)$$

$$C_{\min} = \frac{2 * 5500}{(545^2 - 534^2) * 300} = 3,39 \text{ mF}$$

✚ Výpočet nabíjecí doby kondenzátorové baterie

$$t_C = \frac{\arccos\left(\frac{U_{\min}}{U_{\max}}\right)}{2\pi f} \quad (\text{s}; \text{V}, \text{V}, \text{Hz}) \quad (17)$$

$$t_C = \frac{\arccos\left(\frac{552}{564}\right)}{2 * \pi * 50} = 610,70 \mu\text{s}$$

Výpočet vybíjecí doby kondenzátorové baterie

$$t_{DC} = \frac{1}{f_{REC}} - t_C \quad (\text{s; Hz, s}) \quad (18)$$

$$t_{DC} = \frac{1}{300} - 610,70 \cdot 10^{-6} = 2,72 \text{ ms}$$

Výpočet špičkového nabíjecího proudu kondenzátorové baterie

$$I_{Cpeak} = C \frac{dU}{dt_C} = C \frac{(U_{max} - U_{min})}{dt_C} \quad (\text{A; F, V, V, s}) \quad (19)$$

$$I_{Cpeak} = 3,39 \cdot 10^{-3} \frac{(545 - 535)}{610,70 \cdot 10^{-6}} = 55,59 \text{ A}$$

Výpočet špičkového vybíjecího proudu kondenzátorové baterie

$$I_{DCpeak} = C \frac{dU}{dt_{DC}} = C \frac{(U_{max} - U_{min})}{dt_{DC}} \quad (\text{A; F, V, V, s}) \quad (20)$$

$$I_{DCpeak} = 3,39 \cdot 10^{-3} \frac{(545 - 535)}{2,72 \cdot 10^{-3}} = 12,47 \text{ A}$$

Výpočet efektivního nabíjecího proudu

$$I_{CRMS} = \sqrt{I_{Cpeak}^2 \cdot t_C \cdot f_{REC}} \quad (\text{A; A, s, Hz}) \quad (21)$$

$$I_{CRMS} = \sqrt{55,59^2 \cdot 610,70 \cdot 10^{-6} \cdot 300} = 23,79 \text{ A}$$

Výpočet efektivního vybíjecího proudu

$$I_{DCRMS} = \sqrt{I_{DCpeak}^2 \cdot t_{DC} \cdot f_{REC}} \quad (\text{A; A, s, Hz}) \quad (22)$$

$$I_{DCRMS} = \sqrt{12,47^2 \cdot 2,72 \cdot 10^{-3} \cdot 300} = 11,27 \text{ A}$$

Výpočet efektivního proudu tekoucím kondenzátorovou baterií

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{Cpeak}^2 + I_{DCpeak}^2} \quad (\text{A; A, A}) \quad (23)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{23,79^2 + 11,27^2} = 26,33 \text{ A}$$

Parametry zvoleného kondenzátoru

Výrobce:Kendeil srl.
Typ:K01
Kapacita:2,2 mF
 U_{MAX} :400 V
 I_r (a.c.)max:10,7 A
Rozměry:76 x 105 mm (Ø x d)

Dle výsledku ze vzorce 23 protéká kondenzátorovou baterií 26,33 A, podle parametrů zvoleného kondenzátoru je patrné, že výsledná baterie musí být složena z několika kondenzátorů v sérioparalelním zapojení.

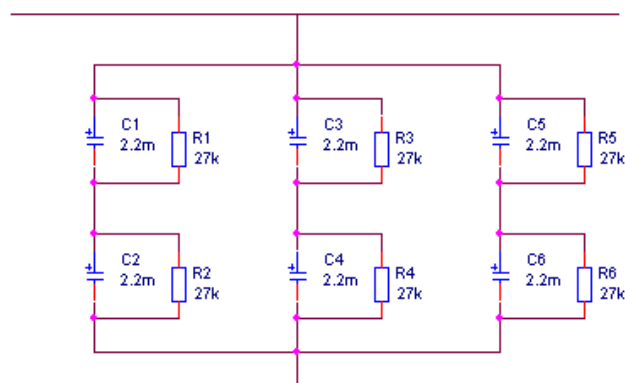
Na obrázku 20 je schéma zapojení kondenzátorové baterie s balančními rezistory. Balanční odpory je vhodné použít pro správné rozložení napětí mezi kondenzátory v sériovém zapojení. Je důležité vybrat kvalitní rezistory s tolerancí lepší nebo rovnou 5%.

Výpočet balančního odporu:

$$R_{vsr} = \frac{1000}{0,015 \cdot C} \quad (\text{k}\Omega; \mu\text{F}) \quad (24)$$

$$R_{vsr} = \frac{1000}{0,015 \cdot 2,2 \cdot 10^3} = 30,3 \text{ k}\Omega$$

Nejbližší nižší hodnota balančního rezistoru je 27kΩ.



Obr. 22 – Schéma zapojení kondenzátorové baterie

3.3 Jištění

Jištění měniče je zabezpečeno pomocí třífázového pojistkového odpojovače firmy OEZ a.s. OPV14S-3 který je zobrazen na obrázku 21. Jištění samotné provádí tavné pojistky typu PV14.

Pomocní přetěžovacího integrálu je určena velikost tavné pojistky:

$$I_{n(m)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/3} i^2(t) dt} = \sqrt{\frac{i^2}{3}} \quad (\text{A}; \text{A}) \quad (25)$$

$$I_{n(m)} = \sqrt{\frac{50^2}{3}} = 28.86 \text{ A}$$

Nejbližší vyšší hodnota dostupné tavné pojistky je 32A. Pro odpojovač OVP14S-3 odpovídá této hodnotě pojistka typu PV14 32AgG.

Tímto jištěním nelze bezpečně ochránit polovodičové prvky před zkratem. IGBT moduly jsou dodatečně chráněny prostřednictvím budičů, které sledují saturační napětí mezi kolektorem a emitorem.



Obr. 23 – Pojistkový odpojovač OPV14S-3



Obr. 24 – Tavná pojistka PV 32AgG

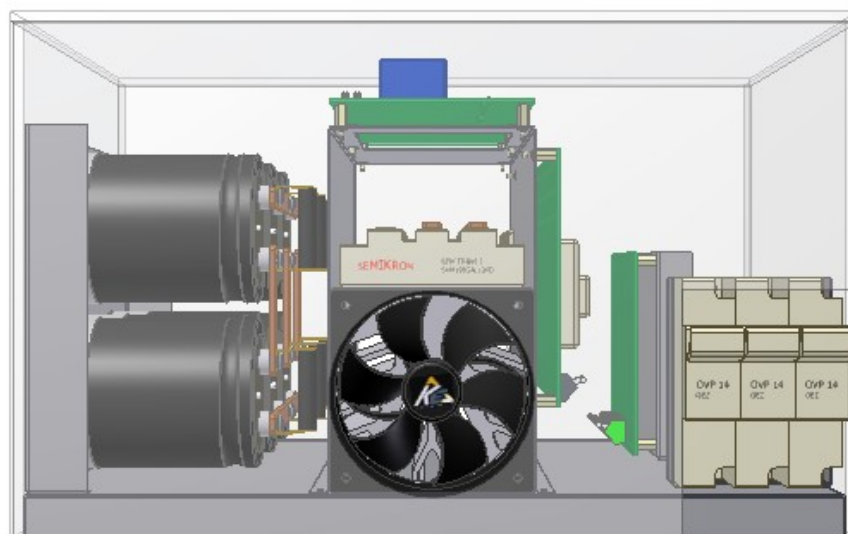
4 Konstrukce měniče

Při konstrukci měniče je důležité vhodné rozmístění dílčích komponent tak, aby se navzájem neovlivňovali a nenarušovali tak chod celého zařízení, především je největší důraz kladen na dodržení elektromagnetické kompatibility.

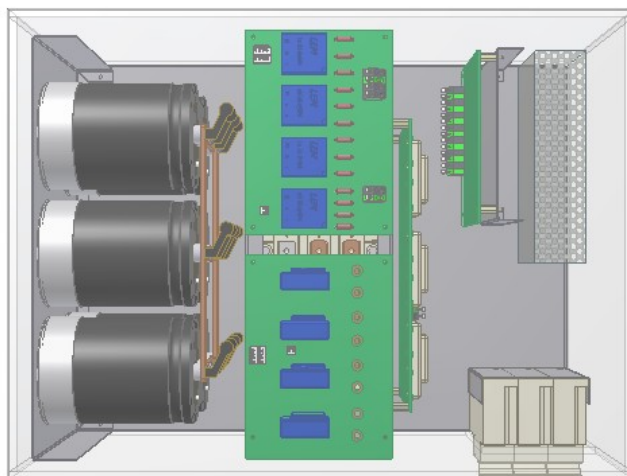
Při rozmísťování samotných bloků měniče je vhodné využít některého z CAD programů díky nimž si lze sestavu vizualizovat v reálných rozměrech a odladit tak nedostatky, které byly z počátku přehlednuty.

4.1 3D CAD model

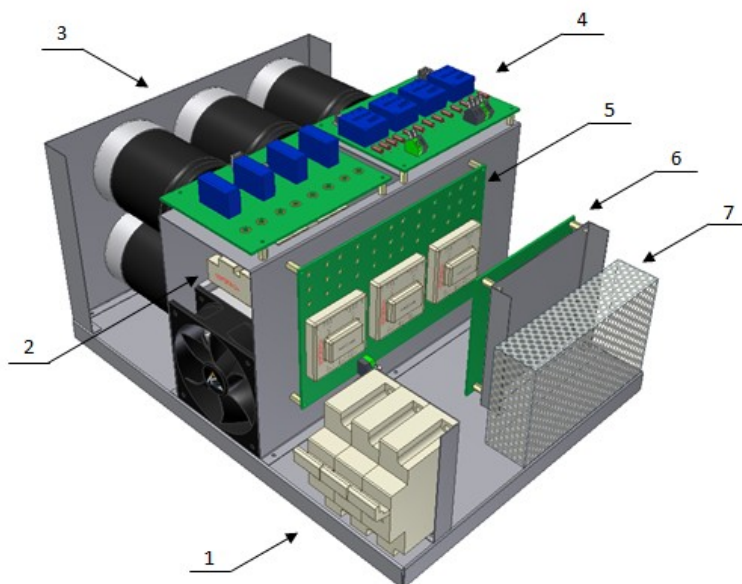
Pomocí programu Autodesk Inventor 2010 je vytvořen virtuální 3D model navrženého měniče. Model a následná technická dokumentace slouží k urychlení výrobního procesu.



Obr. 25 – 3D model – pohled z čela sestavy



Obr. 26 – 3D model – pohled ze shora



Obr. 27 – 3D model – rozložení měniče

- | | |
|---|---------------------------|
| 1. Pojistkový odpojovač | 5. Deska budičů |
| 2. IGBT modul | 6. Řídicí deska Freescale |
| 3. Kondenzátorová baterie | 7. Zdroj |
| 4. Měřicí desky (vzdálenější - napěťová, bližší - proudová) | |

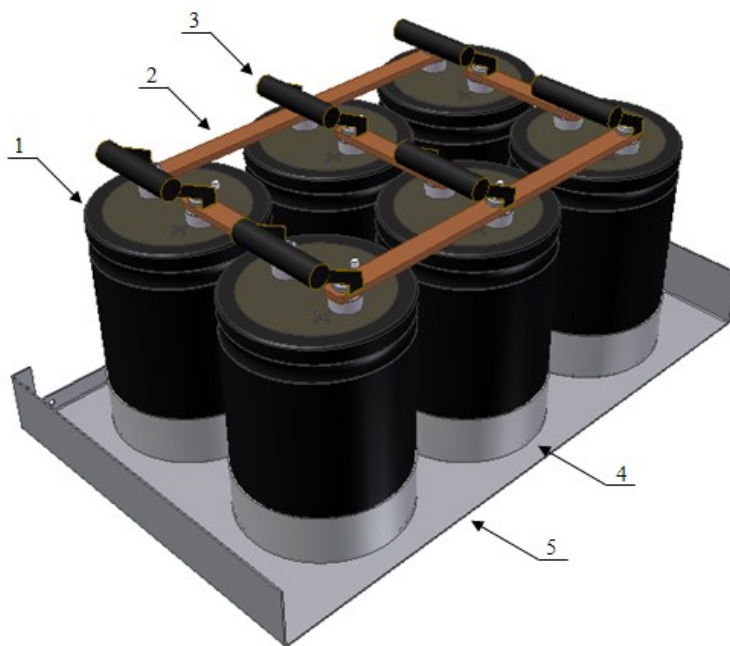
Spodní nosnou desku tvoří plech z nerez oceli o síle 0,8 mm. Celá sestava je zakryta krytem z plexiskla z důvodu bezpečnosti. Měnič je určen především pro laboratorní a výukové účely.

Parametry usměrňovače

Vnější rozměry (š x v x h).....	400 x 250 x 300 mm
Provozní teplota okolí	40 °C
Materiál konstrukce.....	plech nerezový, 0,8 mm
Materiál krytu.....	plexisklo, 5 mm

4.2 Kondenzátorová baterie

Jak je popsáno v kapitole 3.2 kondenzátorová baterie se skládá ze šesti kondenzátorů. Všechny tyto kondenzátory jsou propojeny měděnou pásovinou podle zapojení na obrázku 20. Kondenzátory jsou plechovými držáky uchyceny k nosnému plechu, který je poté kolmo připevněn k základní nosné desce celého měniče. Propojení s výstupem IGBT modulů a výstupem je zajištěno prostřednictvím lanek s očky pro přichycení.



Obr. 28 – 3D model – kondenzátorová baterie

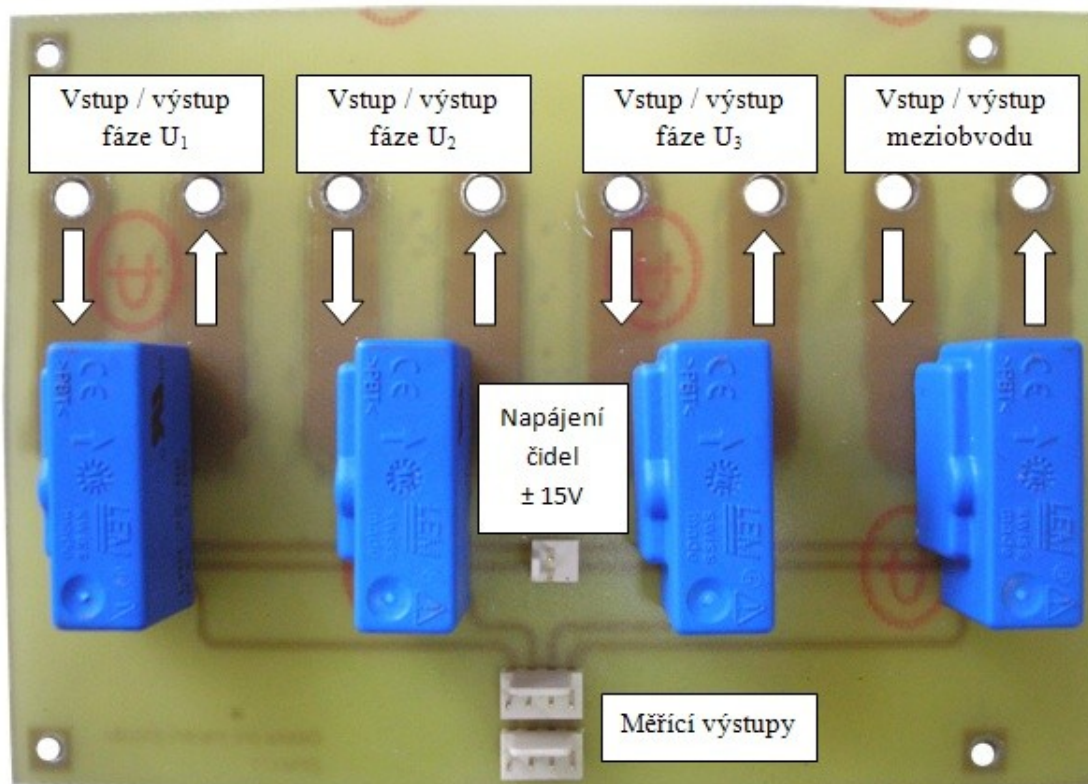
- | | |
|------------------------------|-----------------------|
| 1. Kondenzátor Kendeil 2,2mF | 4. Držák kondenzátorů |
| 2. Měděná pásovina | 5. Nosná deska |
| 3. Balanční rezistor 27kΩ | |

4.3 Měřicí desky

4.3.1 Deska pro měření proudu

Deska pro měření proudu má rozměry 100 x 140 mm a jsou na ní umístěny čtyři čidla LEM LAH 25-NP pro měření proudu vstupních fází a proudu v meziobvodu. Tato čidla mají tři různá zapojení vstupů a výstupů, kterými lze určit maximální měřený proud a tím i přesnost.

Čidla jsou napájena ze zdroje ± 15 V. Měřicí výstupy jsou přivedeny na A/D převodník řídicí desky Freescale. Je k dispozici i druhý výstupní konektor pro připojení na měřicí body v krytu měniče.

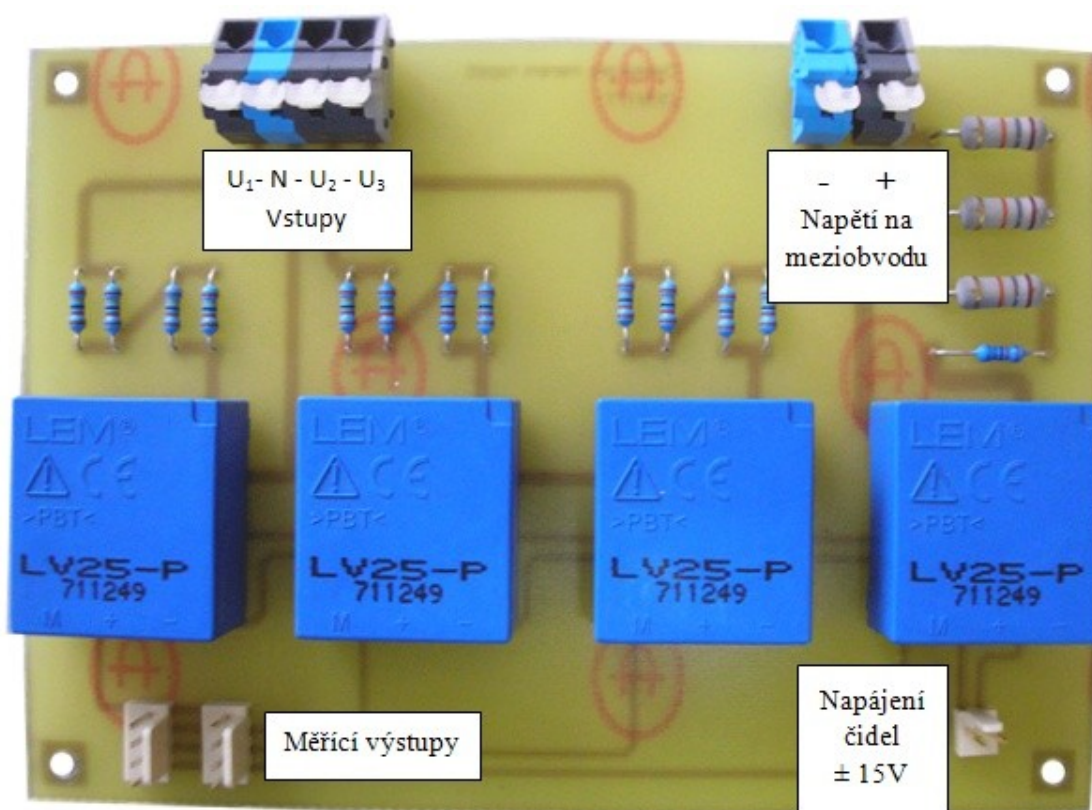


Obr. 29 – Měřicí deska proudů

Čidla jsou sériově umístěna v jednotlivých fázích a v meziobvodu. Připojení je provedeno lanky s kabelovými očky, které jsou k čidlům připojeny šrouby.

4.3.2 Deska pro měření napětí

Deska pro měření napětí se nijak výrazně neliší od desky pro měření proudu. Rozměry jsou zachovány (100 x 140 mm), stejně jako napájení i výstupy čidel. Deska obsahuje rovněž čtyři čidla pro měření napětí typu LEM LV 25 – P napájená ze zdroje ± 15 V. Pro výpočet vstupních odporů je uvažováno napětí na vstupu jednotlivých fází 240 V a napětí na meziobvodu 590 V. Připojení je provedeno pomocí Wago konektorů.



Obr. 30 – Deska pro měření napětí

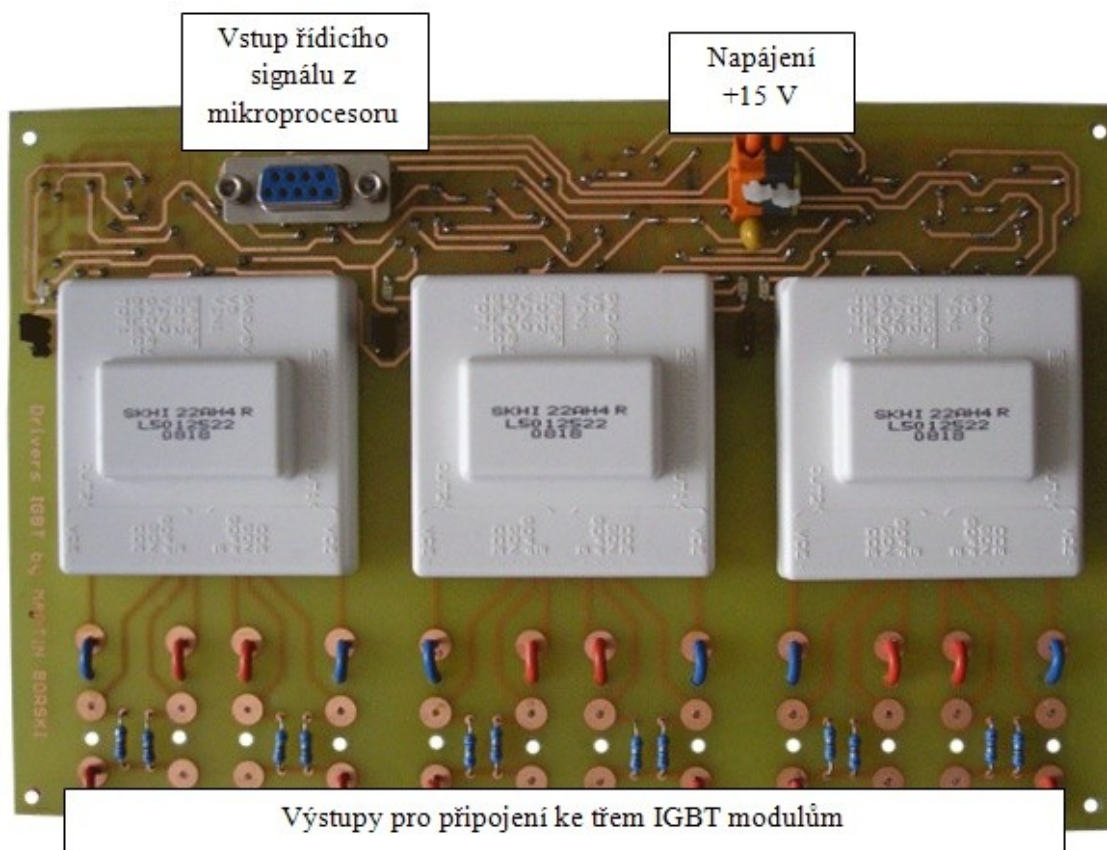
	R [kΩ]	Tolerance [%]	Příkon [W]	Ks
U ₁	24	± 1	0,6	4
U ₂	24	± 1	0,6	4
U ₃	24	± 1	0,6	4
U _{DC}	18	± 1	2	3
	5,6	± 1	0,6	1

Tabulka 1. – Parametry použitých rezistorů

4.3.3 Deska budičů

Deska budičů (obr. 31) je osazena třemi duálními jednotkami budičů SKHI 22A, které zajišťují spínání IGBT modulů. Deska byla vytvořena ve spolupráci s Bc. Martinem Borským.

Napájení zajišťuje zdroj +15 V, v případě poklesu napájecího napájení pod 13 V budiče signalizují chybu červenou LED diodou a informují nadřazený řídicí systém. Řídicí signály z mikroprocesorové desky jsou přivedeny prostřednictvím konektoru D-SUB (Cannon 9pin) na bloky úpravy vstupních signálů. Jednotlivé budiče jsou schopny generovat chybová hlášení, tato hlášení jsou poté přivedena do bloku vyhodnocení chyby.

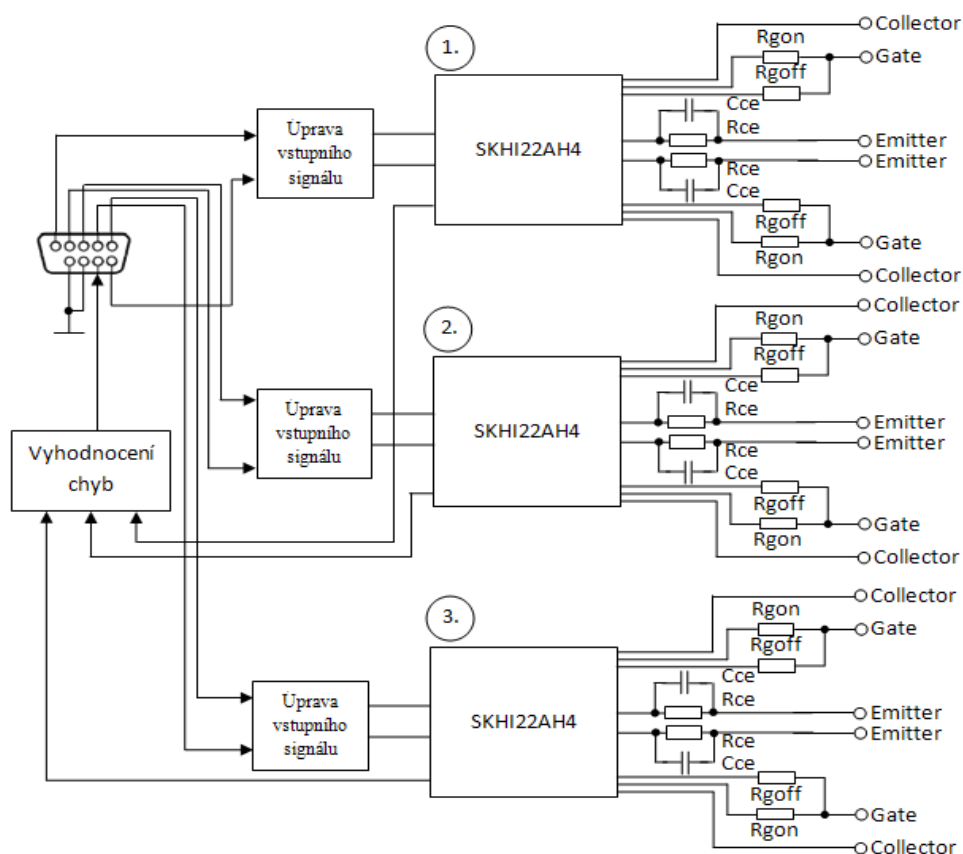


Obr. 31 – Deska budičů IGBT usměrňovače

Výstupní strana budičů obsahuje odpory R_{gon} , R_{goff} , R_{CE} a kondenzátor C_{CE} . Prostřednictvím rezistoru R_{gon} a R_{goff} lze nastavit rychlost spínání a vypínání modulů. Zvýšením hodnoty R_{on}/R_{off} se snižuje rychlost spínání/rozpínání IGBT tranzistorů. Minimální hodnota rezistorů R_{on} a R_{off} je $3\ \Omega$. Typické hodnoty rezistorů a kondenzátoru pro různé typy modulů jsou vypsány v datovém listu budiče. V datovém listu budiče nejsou uvedeny hodnoty pro IGBT modul SKM75GB128D který je použit jako stavební blok tohoto pulsního usměrňovače. Proto je vybrán modul s parametry blízkými modulu použitému (tj. SKM75GB123D).

SK-IGBT-Modul	R_{Gon} Ω	R_{Goff} Ω	C_{CE} pF	R_{CE} $k\Omega$
SKM 50GB123D	22	22	330	18
SKM75GB123D	22	22	330	18
SKM100GB123D	15	15	330	18

Tabulka 2. – Parametry výstupních součástek budiče

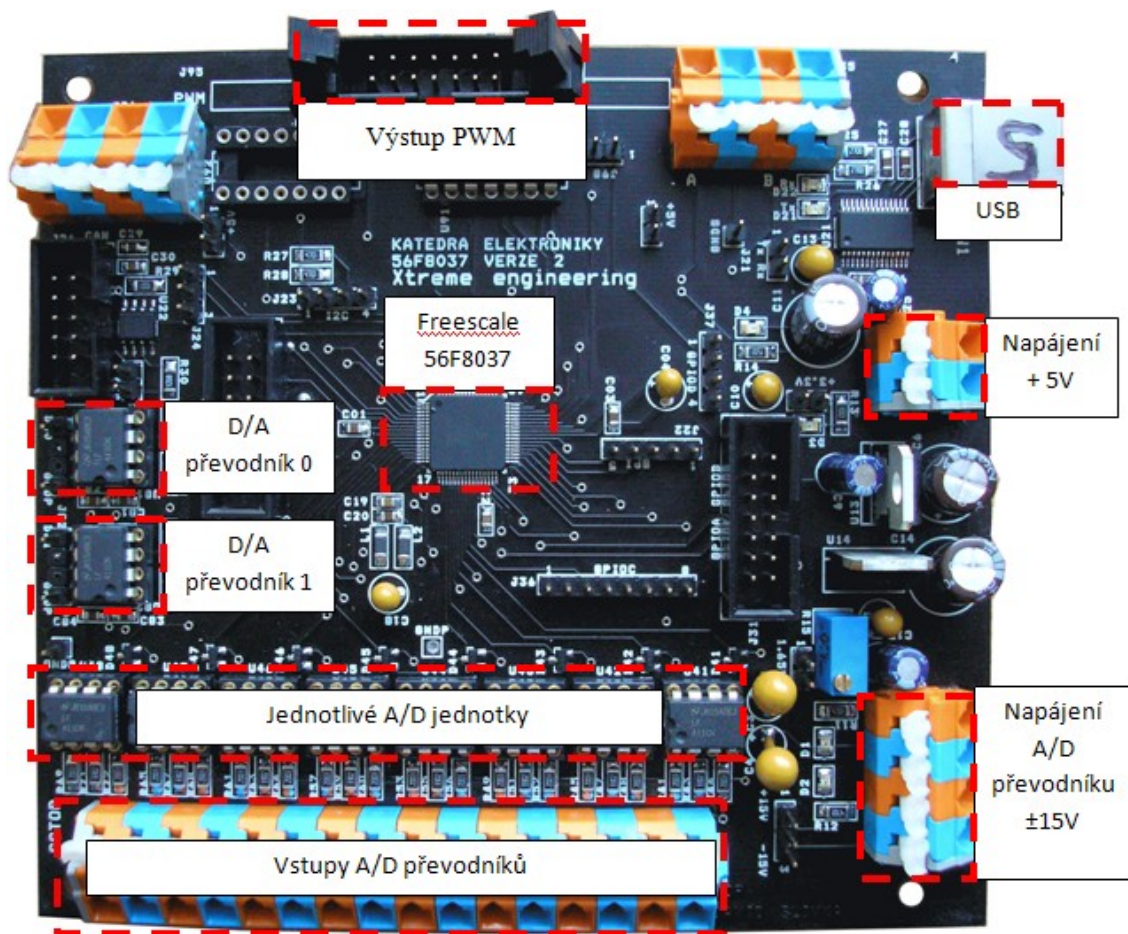


Obr. 32 – Zjednodušené schéma desky budičů

4.4 Řídicí deska Freescale

Tato řídicí deska nebyla součástí návrhu této diplomové práce.

Deska byla dodána katedrou elektroniky. Obsahuje všechny potřebné periferie pro řízení pulsního usměrňovače, tyto periferie jsou popsány v kapitole 2.1. Na obrázku 32 je řídicí deska s rozmístěním použitých periférií a napájení.

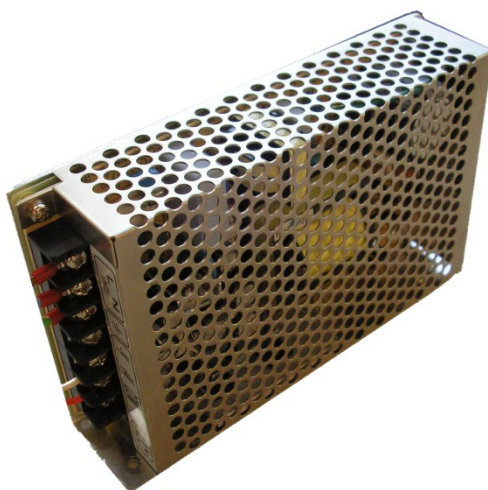


Obr. 32 – Řídicí deska

Řídicí deska je umístěna tak aby bylo možné se i přes kryt z plexiskla připojit k USB a jednotka se dala řídit. Pro přeprogramování programu je zapotřebí připojit JTAG programovací rozhraní. Toto rozhraní není součástí konstrukce a je tedy zapotřebí demontovat kryt měniče.

4.5 Napájení řídicích a měřicích obvodů

Pro napájení mikroprocesorové řídicí desky, budičů tranzistoru IGBT, proudových a napěťových čidel byl zvolen zdroj distribuovaný společností Mean Well. Zvolený model T-60C je napájen napětím v rozmezí 85 – 264 V, výstupní hodnoty zdroje jsou +5V a $\pm 15V$.



Obr. 33. Mean Well T-60C

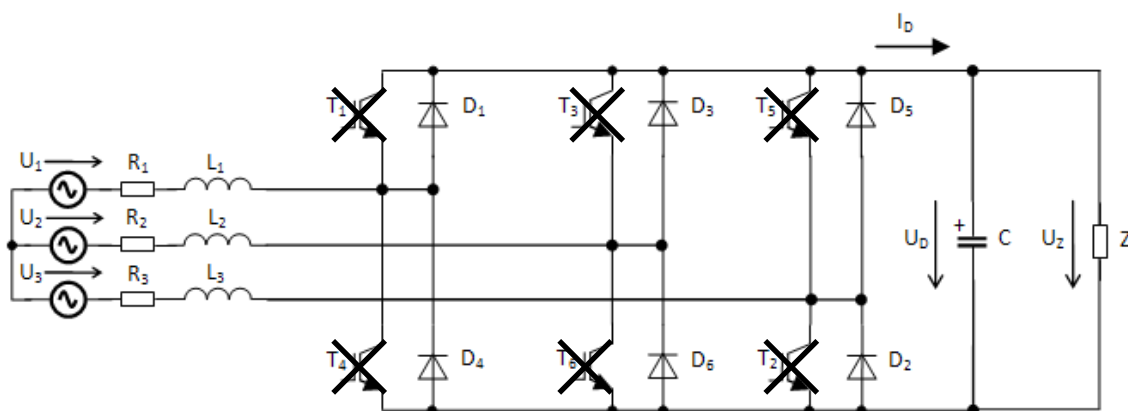
5 Měření

Použité přístroje:

- 3fázový transformátor DTS 400/400/10
- 3x jednofázová tlumivka 0,16H; $R = 0,185\Omega$
- Reostat PR40 P8, 51 Ω
- Reostat 250 Ω , 1,6A
- 2x Laboratorní zdroj Typ 2229
- Multimetr Agilent U1241A
- Osciloskop LeCroy wareRunner 104Xi
 - Proudová sonda CP030
- Řídicí systém s DPS M56F8037

5.1 Neřízený usměrňovač

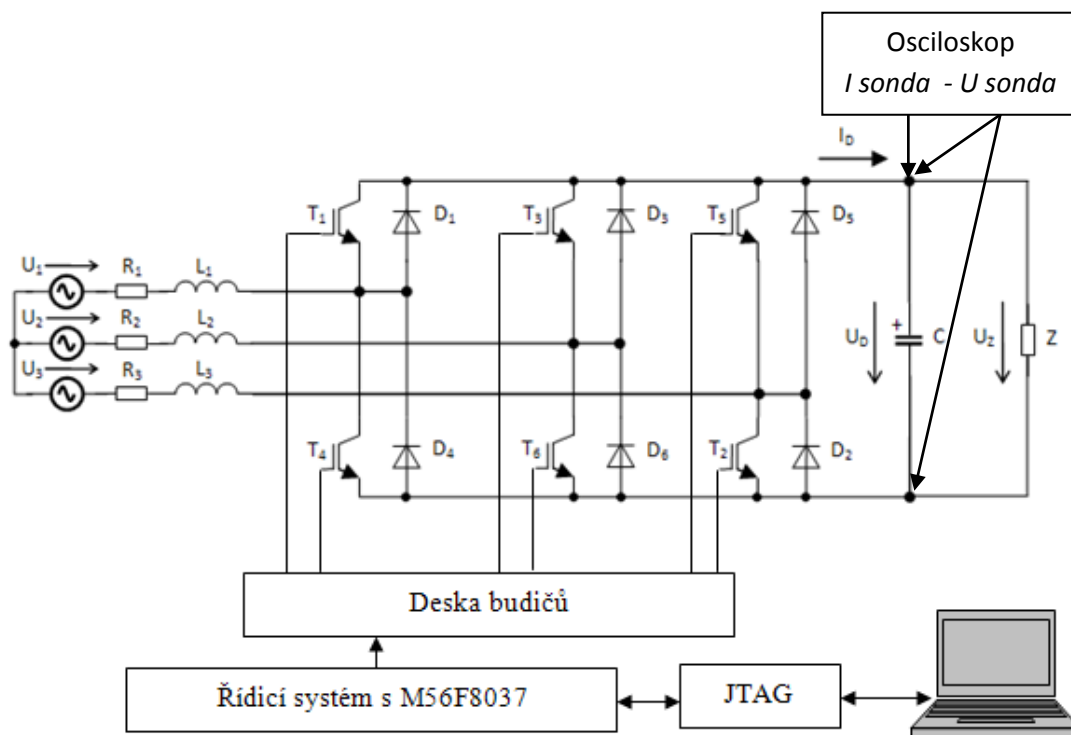
Pro ověření funkčnosti diod v IGBT modulech bylo zapojení upraveno tak, že jsou IGBT tranzistory vypnuty a tedy třífázový obvod byl usměrňován přes diody modulů.



Obr. 34 – Zapojení neřízeného usměrňovače

5.2 Identifikace veličin potřebných pro realizaci struktury vektorového řízení pulsního měniče

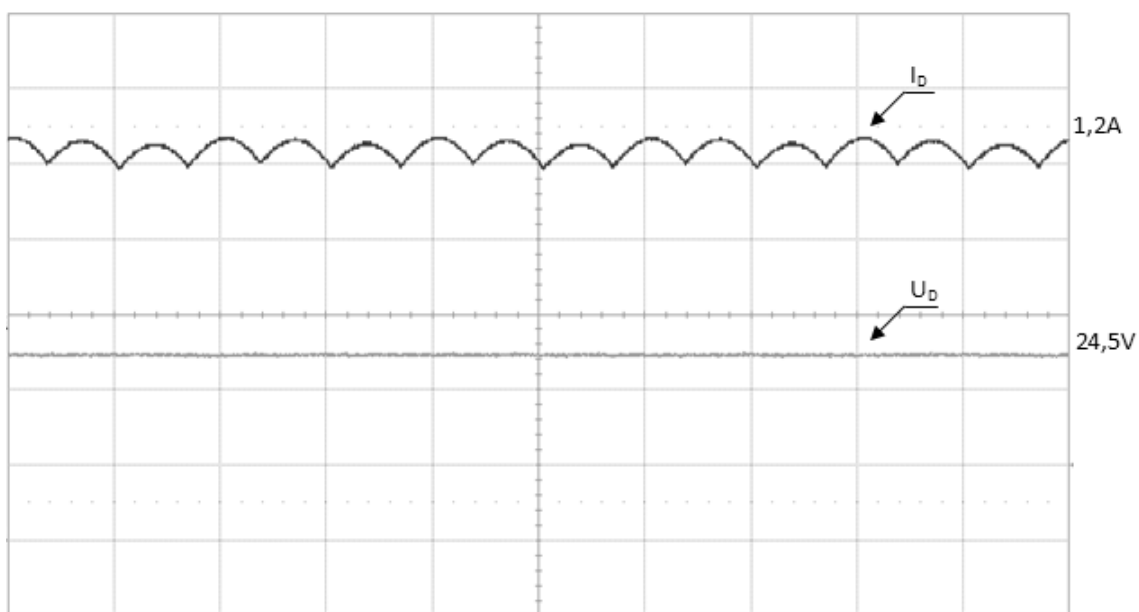
Pro zajištění správného fungování řídicího algoritmu je zapotřebí identifikovat veličiny potřebné pro tento řídicí program.



Obr. 35 – Zapojení napěťového mikroprocesorově řízeného pulsního usměrňovače

Mikroprocesorově řízený pulsní usměrňovač je prostřednictvím programovacího a testovacího rozhraní JTAG propojen s počítačem. Připojením měniče k třífázovému transformátoru bylo možné prostřednictvím softwarového nástroje FreeMaster vyčítat hodnoty napětí a proudu. Pro ověření správnosti vyčítaných hodnot byly vstupní a výstupní proudy změřeny osciloskopem s proudovou sondou.

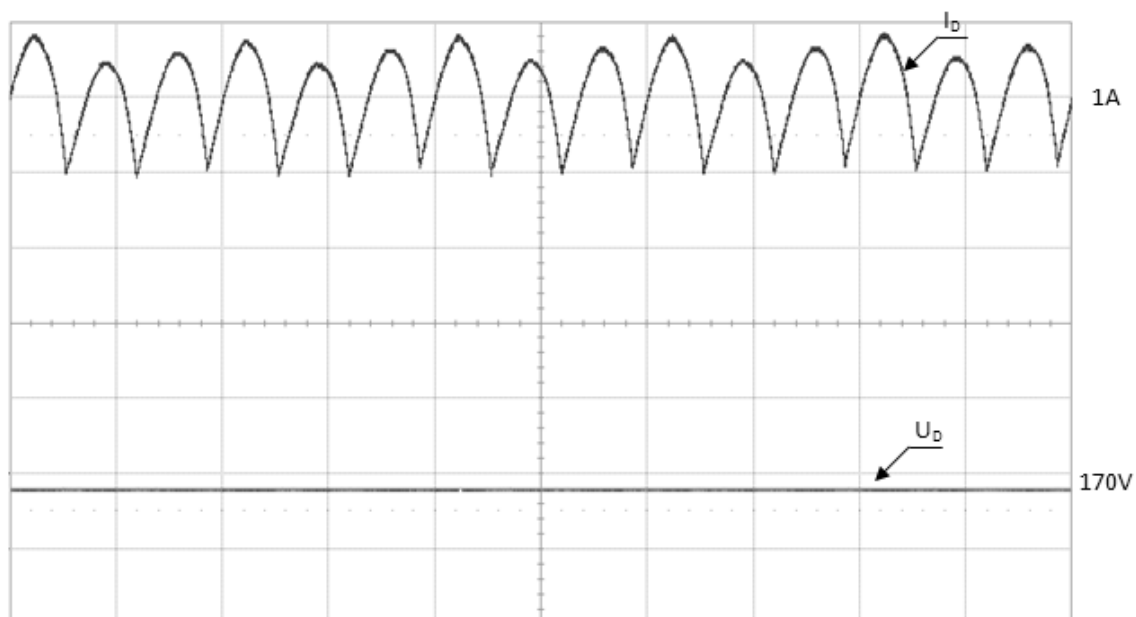
Měření výstupního napětí a proudu měniče



Obr. 36 – Průběh napětí a proudu na výstupu měniče

Měření výstupního napětí a proudu

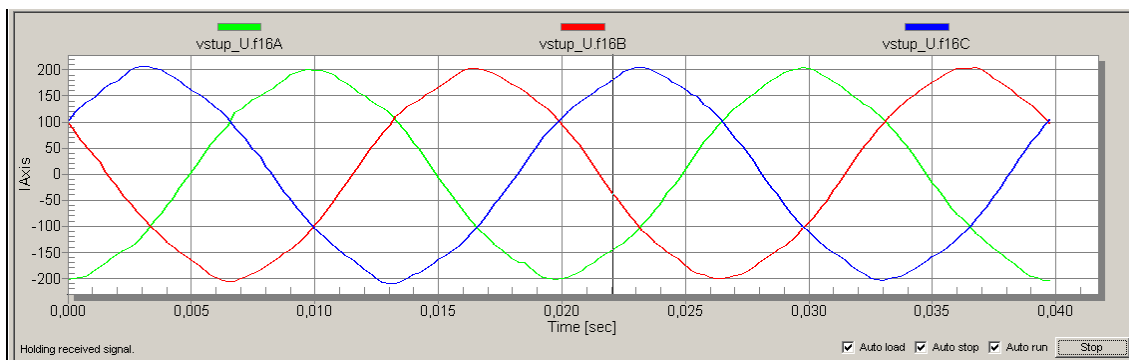
- jako zátěž použít reostat nastaven na 145 Ω



Obr. 37 – Průběh napětí a proudu na výstupu měniče

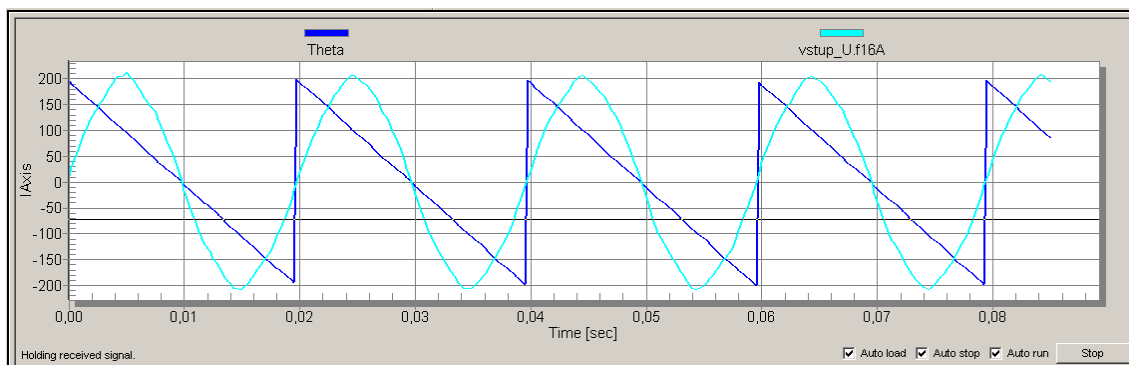
Změřené hodnoty v programovém prostředí FreeMaster

Pomocí programového prostředí FreeMaster bylo možné prostřednictvím napěťových čidel a A/D převodníku zpracovat vstupní napětí a tyto hodnoty zobrazit v grafu.



Obr. 38 – Průběh vstupních napětí v prostředí FreeMaster

Dalším měřením a laděním programu byl zajištěna identifikace veličiny potřebné pro detekci průchodu nulou. Řídicí algoritmus sleduje průchod nulou, jakmile se tak stane, vyšle signál k patřičnému budiči, který sepne příslušný tranzistor. Na obrázku 39 je znázorněn průběh jedné fáze a řídicího úhlu Theta.



Obr. 39 – Průběh vstupního napětí a úhlu Theta v prostředí FreeMaster

Závěr

V úvodu práce byl proveden teoretický rozbor konstruovaného měniče s ověřením funkčnosti prostřednictvím virtuálního nástroje OrCad. Tato simulace ověřila teoretické předpoklady pro napěťový pulsní usměrňovač a následnými výpočty parametrů filtračních prvků bylo docíleno upřesnění parametrů simulace. Výsledek simulace spolu s obvodovým řešením je v závěru kapitoly 1.2.2 Napěťový pulsní usměrňovač. Následný teoretický rozbor byl zaměřen na dílčí části měniče, především však na řídicí obvody (mikroprocesor Freescalle, budič SKHI22AH4) a metody řízení. S ohledem na laboratorní využití tohoto měniče bylo provedeno předimenzování součástek, aby nedošlo ke zničení jednotlivých částí popřípadě celého měniče. Pro návrh mechanické konstrukce a rozmístění dílčích bloků byl využit CAD software Inventor, s jehož pomocí byl vytvořen 3D návrh měniče.

Podle těchto výsledků byla zahájena montáž měniče. Nosné desky a tunel chladiče byly vyrobeny z nerez oceli o tloušťce 0,8 mm. Celý měnič je zapouzdřen krytem z plexiskla, tento kryt má zajistit bezpečnou manipulaci s měničem a zamezit nebezpečnému doteku na živé části.

Před uvedením kompletního měniče byly proměřeny samostatně jednotlivé měřicí a řídicí prvky. Především byl kladen důraz na vhodné nastavení referenčního napájení A/D převodníku na řídicí desce. Dále byly proměřeny měřicí desky pro ověření správné volby měřících odporů.

Funkčnost měniče byla provedena při identifikaci veličin potřebných pro vektorové řízení pulsního usměrňovače.

Literatura:

- [1] Neborák, Ivo. *Výkonové systémy: Výkonová elektronika a elektrické pohony*, Učební text pro kombinované a distanční studium, Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2004
- [2] Vondrášek, František. *Výkonová elektronika, svazek 3, Měniče s vlastní komutací a bez komutace*. Plzeň: ZČU Plzeň, 1998.
- [3] Martiniak, Ľubomír. *Diplomová práce: Pulzní usměrňovač pro nabíjení akumulátorů*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2011.
- [4] Frančík, Ondřej. *Diplomová práce: Jednofázový pulsní usměrňovač*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007.
- [5] Barešová, Kateřina. *Bakalářská práce: Analýza provozních stavů aktivní nabíjecí stanice*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2011.
- [6] Novák, Jaroslav. *Moderní výkonové polovodičové prvky a jejich aplikační možnosti* [online]. [5.1.2012] <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25453>.
- [7] Sattar, Abdus. „*Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Basics*.“ [online]. [10.3.2012] <<http://www.ixyspower.com>>.
- [8] Vaculík, Petr. *Diplomová práce: Střídač hlavního pohonu elektromobilu s vodním chlazením*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2007.
- [9] *Datový list budiče SKHI22AH4* [online]. [28. 9. 2011] <semikron.com>.
- [10] *56F802X and 56F803X Peripheral Reference Manual* [online]. [2. 10. 2011] <<http://freescale.com>>.
- [11] *MC56F8037 Evaluation Module User Manual* [online]. [2. 10. 2011] <<http://freescale.com>>.
- [12] Slivka, David. *Diplomová práce: Řídicí jednotka pohonu vozidla s palivovými články*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2009.
- [13] Sobek, Martin. *Diplomová práce: Laboratorní stanoviště pro předmět Mikropočítačové řídicí systémy II*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2008.
- [14] Brandštetter, Pavel. *Elektrické regulované pohony III, Učební text pro kombinované a distanční studium*, Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2010.
- [15] *Electrolytic Capacitors Application Guide*, [online]. [17. 12. 2011] <http://www.evoxrifa.fi/electrolytic_cat/electrolytic_appguide.pdf>
- [16] Motto, John William. *Introduction to Solid State Power Electronics*. Pennsylvania: POWEREX Semiconductor Division Youngwood, 1977.
- [17] Patočka, Miroslav. *Matematická analýza signálů sinusové PWM*. Plzeň, 1955.

- [18] Patočka, Miroslav. *Výkonové poměry v soustavě trojfázový střídač - asynchronní motor*. Plzeň, 1997.
- [19] Bose, Bimal. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Knoxville: The University of Tennessee, 2002.
- [20] Gurevich, Vladimir. *Electronic devices on discrete components for industrial and power engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [21] Kůs, Václav. *Výkonová elektronika, svazek 4, Rušivé vlivy měničů a jejich omezování*. Plzeň: ZČU Plzeň, 1996.
- [22] Sclater, Neil. *Electronics technology handbook*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [23] Vondrášek, František. *Výkonová elektronika, svazek 6, Projektování výkonových polovodičových měničů - vybrané stati*. Plzeň: ZČU Plzeň, 2008.
- [24] *Vzduchové chladiče pro moduly* [online]. [8. 10. 2011] <<http://www.ckdpoel.cz/products.php/46>>.
- [25] *Datový list IGBT modulu SKM75GB128D* [online]. [30. 9. 2011] <<http://www.alldatasheet.com>>.
- [26] Šandera, Josef. *Návrh plošných spojů pro povrchovou montáž*. Praha: BEN - technická literatura, 2006.
- [27] *Datový list LAH 25-NP* [online]. [20. 10. 2011] <<http://www.lem.com>>.
- [28] *Datový list LV 25-P* [online]. [20. 10. 2011] <<http://www.lem.com>>.
- [29] *Datový list kondenzátoru K01* [online]. [20. 11. 2011] <<http://www.kendeil.com>>.
- [30] *Pojistkové systémy* [online]. [20. 10. 2011] <<http://www.oez.cz>>.
- [31] Tremblay, Thom. *Autodesk Inventor 2010: No Experience Required*. Indianapolis, 2009.
- [32] *Datový list T-60 series* [online]. [12. 11. 2011] <<http://www.meanwell.com>>.

Seznam příloh:

1. Měřicí deska napětí
 - Obvodové schéma, deska plošného spoje, realizace
2. Měřicí deska proudu
 - Obvodové schéma, deska plošného spoje, realizace
3. Deska budičů
 - Obvodové schéma (A3), deska plošného spoje (vrstvy Top a Bottom)
4. Kondenzátorová baterie
 - Realizace
5. Konstrukce
 - Výroba desek plošných spojů, ověření funkčnosti, dílčí části měniče
 - Kompletní měnič z různého pohledu bez krytu a s krytem
6. Měřicí stanoviště